



FEUP Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE
COMPOSIÇÕES DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL.
AFERIÇÃO DAS SUAS CARACTERÍSTICAS
MECÂNICAS E DURABILIDADE.**

Helena Isabel Maia Figueiras

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil,
realizada sob supervisão da Professora Joana Sousa Coutinho
do Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

"Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil e,
no entanto, é o que mais precioso temos."

Albert Einstein

Índice geral

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DO TEXTO	vii
SIMBOLOGIA	xi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1.1
CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIA DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL	2.1
CAPÍTULO 3 – CONCEPÇÃO DE UM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL	3.1
CAPÍTULO 4 – ENSAIO À ESCALA REAL EM NELAS	4.1
CAPÍTULO 5 – ENSAIO À ESCALA REAL EM RIO MAIOR	5.1
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	6.1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	R.1
ANEXO A	A.1
ANEXO B	B.1
ANEXO C	C.1
ANEXO D	D.1
ANEXO E	E.1

Agradecimentos

Ao concluir este trabalho deixo aqui os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de perto ou de longe me ajudaram a levá-lo ao seu termo.

À Professora Joana Sousa Coutinho, orientadora desta dissertação, desejo exprimir a minha profunda gratidão e admiração pela forma como sempre me incentivou, através de uma supervisão interessada, constante e incansável. A sua amizade, a sua experiência e a sua análise crítica foram essenciais no desenvolvimento de todo o trabalho.

Agradeço à amiga e Professora Sandra Nunes os seus ensinamentos, a sua ajuda, as discussões diárias e, por fim, a revisão crítica e minuciosa do presente texto. Devo dizer que foi um privilégio trabalhar ao seu lado.

Ao meu Pai e Professor Joaquim Figueiras, com quem colaborei em muitos trabalhos, gostaria de deixar aqui um especial agradecimento. O seu espírito criador, os seus preciosos ensinamentos, a constante orientação e crítica rigorosa foram sem dúvida determinantes na concretização desta dissertação.

À Professora Ana Maria Proença agradeço a disponibilidade na troca de impressões no âmbito do betão enquanto material, sempre valiosas para o desenrolar do trabalho efectuado.

Apresento também o meu agradecimento à Professora Paula Milheiro pela sua preciosa ajuda no que concerne à utilização de ferramentas estatísticas.

Todo o trabalho de investigação laboratorial só foi possível com a colaboração do pessoal técnico do Laboratório de Materiais, Sr. Fernando e Sr. Manuel e do LABEST, Sr. Monteiro, Amândio e, em especial à Paula. Os meus sinceros agradecimentos.

Cumpre-me ainda referir a importância do apoio financeiro e logístico proporcionado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, pela instituição I&D (*FEUP/LABEST*) e pelas empresas do consórcio do projecto BACPOR, nomeadamente MOTA-ENGIL, SIKA e MAPREL.

Ao amigo e engenheiro Diogo Ribeiro pela dedicação dispendida na revisão final do texto.

Não posso esquecer a ajuda, a simpatia, a boa disposição e a competência demonstradas pela D. Maria Vitória, Elisabete, Marta, Cláudia, Joana, D. Maria Teresa e D. Júlia funcionárias da Secção de Estruturas e Secção de Materiais.

Aos colegas e amigos da Faculdade de Engenharia agradeço sinceramente pela troca de ideias e pelo apoio sempre demonstrado.

Quero ainda agradecer a todos os meus Amigos do Mindelo o facto de acreditarem sempre em mim e me incentivarem nos momentos de menor ânimo.

Apresento um agradecimento muito especial aos meus pais, Emília e Joaquim e à minha irmã Luísa pela forma incondicional e constante como sempre me apoiaram. Ao Mário, deixo aqui uma palavra muito especial. O seu amor, amizade e encorajamento foram sem dúvida pedras basilares deste trabalho.

Resumo

A durabilidade das estruturas de betão armado é actualmente encarada com grande preocupação, constituindo um verdadeiro desafio para o desenvolvimento de uma construção sustentável. O betão auto-compactável (BAC), desenvolvido inicialmente no Japão, representa uma evolução dos betões especiais, capaz de conferir à construção benefícios tecnológicos, económicos e ambientais. Trata-se de uma tecnologia sustentável cuja principal vantagem é a colocação sem necessidade de compactação obtendo-se um material homogéneo e portanto mais durável.

Este novo betão apresenta-se como provável substituto do betão convencional sendo por isso premente levar a cabo o desenvolvimento de um método racional de dimensionamento de BAC que conduza a composições económicas e robustas. Apesar de terem sido propostos vários métodos de dimensionamento de composições de betão auto-compactável, não existe actualmente nenhum método que reúna o total consenso da comunidade científica. Este trabalho pretende, em parte, ser um contributo para o estabelecimento de uma metodologia orientada que considere as propriedades específicas da cada material constituinte, e que conduza a uma composição otimizada, satisfazendo os requisitos de desempenho. Para o efeito, partindo do estado actual do conhecimento, são propostas duas metodologias distintas de dimensionamento de composições de BAC, o *Método proposto pela FEUP*, baseado num procedimento de tentativa-erro, e o *Dimensionamento experimental apoiado na estatística*, que através de um conjunto de modelos numéricos relaciona as propriedades relevantes do betão fresco e endurecido com as características dos materiais.

Em Portugal, a implementação do BAC na indústria da construção está ainda numa fase embrionária, tornando-se imperativo a realização de ensaios à escala real que permitam demonstrar as vantagens da aplicação desta nova tecnologia e identificar as principais alterações a implementar no processo corrente de fabrico, transporte e colocação. Partindo das composições de BAC estudadas em laboratório levaram-se a cabo duas experiências na indústria da pré-fabricação durante as quais foram betonadas algumas das peças correntemente produzidas em fábrica. O carácter inovador da tecnologia do BAC levou a que durante estes ensaios se realizasse uma caracterização alargada das suas propriedades mecânicas e de durabilidade e se procedesse à sua comparação com o betão convencional habitualmente utilizado nas peças.

Na perspectiva de poder contribuir para a construção de estruturas mais duráveis, foi avaliada a aplicação de sistemas de cofragem de permeabilidade controlada (CPF) em peças betonadas com BAC e com betão convencional, tendo-se observado uma maior eficácia destes sistemas no caso da utilização do BAC.

Abstract

Durability of concrete structures is presently looked at with great concern as it represents a challenge to achieve sustainable development in construction. Self Compacting Concrete (SCC), initially developed in Japan, corresponds to an advancement in special concrete types as it leads to technological, economic and environmental benefits. The main advantage of this sustainable technology lies in the unneeded compaction during placing thus leading to an homogeneous and more durable material.

This new type of concrete is the most probable substitute of conventional concrete hence it is important to develop a rational mix design method for SCC resulting in economic and robust mixes. Several SCC mix design methods have been proposed but none has yet been universally accepted by the scientific community. Part of the work presented in this thesis aims to be a contribute to the development of a focused methodology considering the specific properties of each material leading to an optimized SCC mix which fulfils performance requirements. Considering the state-of-the art on the subject, two different SCC mix design methods are presented, the *FEUP method*, based on a trial-error procedure and the *Mix design experimental statistic-based method* which relates, through numerical models, relevant properties of fresh and hardened SCC to features of the materials used.

SCC implementation in the Portuguese construction industry is still in an early phase. It is vital to carry out full scale testing to reveal the advantages of this new technology and identify possible improvements to the current production, transport and placement processes. Setting off with SCC mixes proportioned in the laboratory, two full scale trials were carried out in the concrete prefabrication industry. This work involved production of elements usually produced at the prefabrication sites but using SCC. SCC and corresponding traditional concrete elements were compared in terms of mechanical and durability properties.

Considering further enhancement of concrete durability, application of CPF- Controlled Permeability Formwork was also considered. Two different CPF systems were applied to both SCC and corresponding traditional concrete elements confirming efficiency of this additional method to enhance concrete performance.

Índice do texto

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento	1.1
1.2 Objectivos da dissertação	1.3
1.3 Organização em capítulos da dissertação	1.4

CAPÍTULO 2 – TECNOLOGIA DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.1 Introdução	2.1
2.1.1 Conceito de betão auto-compactável	2.1
2.1.2 Origem, desenvolvimento e aplicações	2.2
2.1.2.1 Origem do betão auto-compactável	2.2
2.1.2.2 Desenvolvimento do betão auto-compactável	2.5
2.1.2.3 Aplicações práticas do betão auto-compactável	2.6
2.1.3 Vantagens técnicas e económicas	2.10
2.2 Avaliação das propriedades do betão auto-compactável fresco	2.13
2.2.1 Propriedades do betão fresco	2.13
2.2.1.1 A trabalhabilidade do BAC: propriedades e auto-compactabilidade	2.13
2.2.1.2 Reologia, uma ferramenta para caracterizar o betão auto-compactável	2.16
2.2.2 Ensaio para avaliação das propriedades do betão no estado fresco	2.20
2.2.2.1 Ensaio reológico	2.22
2.2.2.2 Ensaio de espalhamento	2.25
2.2.2.3 Ensaio de fluidez	2.27
2.2.2.4 Ensaio da caixa-U	2.28
2.2.2.5 Ensaio da caixa-L	2.30
2.3 Materiais constituintes e seus efeitos nas propriedades do betão	2.31
2.3.1 Materiais finos	2.32
2.3.1.1 Cimento	2.33
2.3.1.2 Adições	2.34
2.3.2 Agregados	2.39
2.3.2.1 Agregado fino	2.40

2.3.2.2 Agregado grosso.....	2.41
2.3.3. Adjuvantes	2.41
2.3.3.1 Superplastificante	2.42
2.3.3.2 Agentes de viscosidade	2.45
2.3.4 Água	2.47
2.3.5 Ar	2.47

CAPÍTULO 3 – CONCEPÇÃO DE UM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

3.1 Métodos desenvolvidos para a concepção de composições	3.1
3.1.1 Método proposto por Okamura <i>et al.</i>	3.4
3.1.2 Método proposto pela JSCE	3.7
3.1.3 Método proposto pelo CBI	3.8
3.1.4 Método proposto pelo LCPC	3.10
3.1.5 Método proposto pela UPC	3.12
3.1.6 Limitações dos métodos propostos	3.13
3.1.7 Linhas de investigação seguidas mais recentemente	3.14
3.2 Método proposto pela FEUP	3.18
3.2.1 Motivação	3.18
3.2.2 Bases da metodologia proposta	3.19
3.2.2.1 Requisitos de desempenho e caracterização dos materiais	3.20
3.2.2.2 Estudos em pastas	3.21
3.2.2.3 Estudos em argamassas	3.27
3.2.2.4 Estudos em betões	3.30
3.2.3 Aplicação prática da metodologia à composição MAPREL-Nelas	3.31
3.2.3.1 Requisitos de desempenho e caracterização dos materiais	3.31
3.2.3.2 Estudos em pastas	3.33
3.2.3.3 Estudos em argamassas	3.37
3.2.3.4 Estudos em betões	3.40
3.2.4 Discussão e apreciação da metodologia	3.43
3.3 Dimensionamento experimental apoiado na estatística	3.45
3.3.1 Programa experimental	3.46
3.3.1.1 Estratégia de experimentação	3.46
3.3.2 Resultados dos ensaios	3.53
3.3.3 Modelos de resposta	3.55
3.3.3.1 Modelos ajustados	3.55

3.3.3.2 Precisão dos modelos propostos	3.63
3.3.4 Efeitos individual e de interacção de cada um dos parâmetros	3.67
3.3.4.1 Efeito individual de cada um dos parâmetros	3.67
3.3.4.2 Efeito de interacção entre parâmetros	3.68
3.3.4.3 Efeito geral dos parâmetros nas variáveis de resposta	3.69
3.3.5 Discussão e apreciação da metodologia	3.74

CAPÍTULO 4 – ENSAIO À ESCALA REAL EM NELAS

4.1 Motivação	4.1
4.2 Descrição do ensaio	4.2
4.3 Dificuldades encontradas	4.5
4.4 Propriedades endurecidas do BAC e do BC	4.6
4.4.1 Aferição e comparação da propriedades mecânicas	4.7
4.4.1.1 Resistência à compressão	4.8
4.4.1.2 Módulo de elasticidade	4.10
4.4.1.3 Resistência à tracção	4.12
4.4.1.4 Fluência e retracção	4.13
4.4.2 Aferição e comparação das propriedades de durabilidade	4.20
4.4.2.1 Absorção de água por capilaridade	4.21
4.4.2.2 Resistência à penetração dos cloretos	4.25
4.4.2.3 Resistência à carbonatação	4.30

CAPÍTULO 5 – ENSAIO À ESCALA REAL EM RIO MAIOR

5.1 Motivação	5.1
5.2 Descrição do ensaio	5.2
5.2.1 Elementos betonados	5.2
5.2.2 Amassadura, transporte e colocação	5.6
5.3 Produto final – Aspecto dos elementos betonados	5.9
5.4 Propriedades endurecidas do BAC e do BC	5.13
5.4.1 Aferição e comparação das propriedades mecânicas	5.14
5.4.1.1 Resistência à compressão	5.14
5.4.1.2 Módulo de elasticidade	5.20
5.4.1.3 Resistência à tracção	5.22

5.4.2 Aferição e comparação das propriedades de durabilidade	5.24
5.4.2.1 Absorção de água por capilaridade	5.24
5.4.2.2 Profundidade de penetração de água sob pressão	5.26
5.4.2.3 Resistência á penetração dos cloretos	5.27
5.4.2.4 Resistência à carbonatação	5.29
5.5 Robustez da composição	5.30

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões gerais	6.1
6.1.1 Metodologias para dimensionamento de composições de BAC	6.1
6.1.2 Adequabilidade dos processos produtivos correntes de amassadura, transporte e colocação do betão para a aplicação do BAC na indústria da pré-fabricação	6.3
6.1.3 Propriedades mecânicas e de durabilidade do BAC e do BC	6.4
6.1.4 Aplicação do sistema CPF em peças betonadas com BAC e com betão convencional	6.6
6.2 Propostas para desenvolvimentos futuros.....	6.7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	R.1
-----------------------------------------	------------

ANEXO A	A.1
----------------------	------------

ANEXO B	B.1
----------------------	------------

ANEXO C	C.1
----------------------	------------

ANEXO D	D.1
----------------------	------------

ANEXO E	E.1
----------------------	------------

SIMBOLOGIA

Asi	Coeficiente de absorção da areia i
Ag	Coeficiente de absorção da brita
Desp	Diâmetro de espalhamento medido no ensaio de espalhamento
Ep	Factor de deformação
f/c	Razão entre a massa de filler e a de cimento
G _p	Área de espalhamento relativa para as pastas
G _m	Área de espalhamento relativa para as argamassas
H	Altura alcançada pelo betão no segundo compartimento depois de passar através dos varões, no ensaio da caixa U
Hsi	Teor de humidade da areia i
Hg	Teor de humidade da brita
H2/H1	Razão entre as alturas atingidas pelo betão, no final da caixa-L, na parte da frente e parte de trás da caixa U
R _m	Tempo de escoamento relativo para argamassas
s/(s+g)	Razão entre a massa de areia e a massa total de agregados
Sp/c	Razão entre a massa de superplastificante e de cimento
Sp/p	Razão entre a massa de superplastificante e de finos
s1/s	Razão entre a massa de areia 1 e a massa total de areia
T _{final}	Tempo que decorre desde o início do levantamento do cone até que o betão deixe de se deformar, no ensaio de espalhamento
T _{funil}	Tempo que decorre entre a abertura do orifício de descarga e o aparecimento do primeiro raio de luz no fundo do funil, no ensaio do funil
T ₂₀	Tempo que o betão demora a alcançar a marca dos 20cm, no ensaio da caixa L
T ₄₀	Tempo que o betão demora a alcançar a marca dos 40cm, no ensaio da caixa L

T50	Tempo que o betão demora a alcançar a marca dos 500mm, no ensaio do espalhamento
V_a	Volume de ar
V_{ap}	Volume aparente
V_g	Volume de brita
$V_{g,lim}$	V_g correspondente a $V_{ap}=1m^3$
V_p	Volume de finos
V_s	Volume de areia seca
V_{sp}	Volume de superplastificante líquido
V_w	Volume de água
V_w/V_p	Razão entre o volume de água e o volume de finos
w/c	Razão entre a massa de água e a massa de cimento
w/p	Razão entre a massa de água e a massa de finos
w_c	Massa de cimento por m^3
w_f	Massa de filler por m^3
w_{gd}	Massa de brita seca por m^3
w_{gdc}	Massa de brita corrigida por m^3 , devido à humidade
w_p	Massa de pasta por m^3
$w_{(s+g)d}$	Massa de agregados secos por m^3
w_{sd}	Massa de areia seca por m^3
w_{sdc}	Massa de areia corrigida, por m^3 , devido à humidade
w_{sp}	Massa de superplastificante por m^3
$w_{sp,sólido}$	Massa de superplastificante sólido por m^3
w_w	Massa de água efectiva por m^3
w_{wc}	Massa de água corrigida por m^3
β_p	V_w/V_p correspondente a uma deformação da pasta nula

γ	Taxa de deformação
γ_{sp}	Teor de sólidos do supreplastificante
η	Viscosidade
η_{pl}	Viscosidade plástica
η_H	Viscosidade de Herschel-Bulkley
ρ_c	Massa volúmica do cimento
ρ_f	Massa volúmica do filer
ρ_{gd}	Massa volúmica da brita seca
ρ_p	Massa volúmica da pasta
ρ_{sp}	Massa volúmica da areia seca
ρ_{sp}	Massa volúmica do superplastificante líquido
ρ_w	Massa volúmica da água
τ	Tensão de corte
τ_0	Tensão de cedência

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

As excepcionais propriedades do betão armado enquanto material de construção determinaram, nas últimas décadas, uma rápida expansão da sua utilização. Como material de inegáveis potencialidades, utilizado numa grande panóplia de obras, representa cada vez mais um factor de grande relevância na economia de um país. No entanto as estruturas de betão encontram-se sujeitas a processos de degradação que colocam em causa a sua durabilidade, com graves consequências económicas, ambientais e sociais. Uma acção mais interventiva na prevenção e manutenção da durabilidade do betão torna-se fulcral para que sejam atingidos tempos de serviço mais longos e com baixos custos de manutenção. A filosofia de “projectar e construir para a durabilidade” deve, cada vez mais, ser encarada como uma prática corrente.

A durabilidade das estruturas de betão depende, numa primeira instância da densidade do betão de recobrimento, contudo é, em grande medida, o resultado da qualidade da produção, das condições de betonagem, da compactação em zonas congestionadas de armaduras e das condições de cura. A crescente necessidade de projectar estruturas duráveis, prolongando a sua vida útil, torna imperativo a utilização de medidas de protecção adicional que possam de certa forma retardar os processos de corrosão das armaduras e deterioração do betão. Medidas como a utilização de sistemas de cofragem de permeabilidade controlada (CPF) ou do betão auto-compactável (BAC) influenciam de forma positiva a qualidade da camada de recobrimento do betão na resistência à entrada de agentes agressivos.

O betão auto-compactável, desenvolvido inicialmente no Japão, destaca-se como sendo uma tecnologia sustentável sob os aspectos social, económico e ambiental. Surge como o desenvolvimento mais revolucionário das últimas décadas na tecnologia do betão, envolvendo um novo processo de produção e colocação do betão que assenta na eliminação da vibração, de forma a diminuir o custo global da betonagem e aumentar a qualidade do processo produtivo e do produto final.

As propriedades do BAC nos estados fresco e endurecido são afectadas pelas características físicas e químicas dos materiais e suas proporções relativas na composição. As propriedades deste betão, mais do que no betão convencional, dependem dos materiais utilizados na região, da composição e do próprio processo de produção, transporte e colocação. O método utilizado tradicionalmente para o dimensionamento de composições de betão convencional não se adequa a este “novo” betão. A maioria das abordagens adoptadas actualmente para o estudo de composições de BAC baseia-se em procedimentos de tentativa-erro, que além de pouco racionais implicam gastos significativos de tempo e recursos. A capacidade competitiva desta nova tecnologia vai depender do desenvolvimento de uma metodologia mais orientada que conduza a uma composição otimizada satisfazendo os requisitos de desempenho e que proporcione, tanto quanto possível, composições económicas e robustas.

Considerando a complexidade e o conservadorismo da estrutura do sector da construção, não há dúvidas que o desenvolvimento do betão auto-compactável foi extraordinariamente rápido, primeiro no laboratório, depois em aplicações *in situ*, sendo actualmente utilizado em muitos mercados. Na indústria da pré-fabricação, vencidas as barreiras iniciais, tem-se verificado uma notável adesão a este novo material com vantagens económicas e ambientais evidentes. A natureza repetitiva e sob condições controladas da produção em fábrica constitui presumivelmente o ambiente ideal para suportar a implementação desta nova tecnologia (Skarendahl, 2003).

O sistema de cofragem de permeabilidade controlada (CPF) é um tipo de cofragem que permite melhorar a superfície do betão reduzindo a razão água/ligante nas camadas superficiais. Trata-se de um sistema constituído por um filtro/dreno que permite a passagem do ar e água, mas que é suficientemente fino para impedir a perda de partículas de cimento. A sua utilização melhora a resistência à entrada de agentes agressivos tais como os cloretos ou a carbonatação e reduz os efeitos de cura deficiente (Coutinho, 2005). A aplicação do sistema CPF melhora efectivamente a qualidade da camada de recobrimento mas não inibe os problemas decorrentes da má compactação ou da criação de ninhos de brita.

Atendendo às vantagens e limitações inerentes a cada uma das medidas de protecção adicional referidas, perspectiva-se que a utilização de um sistema de cofragem de permeabilidade controlada conjuntamente com a tecnologia do betão auto-compactável permitirá um efeito sinérgico na melhoria da durabilidade das estruturas de betão.

1.2 OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO

No sector da Indústria da Construção existe uma constante necessidade de inovar e introduzir atempadamente novas tecnologias para conseguir por um lado, manter a competitividade com as empresas congéneres estrangeiras e por outro lado, contribuir para a sustentabilidade das estruturas de betão. O presente trabalho pretende ser um contributo para a implementação sustentada de novas tecnologias na indústria da construção portuguesa, dando-se especial destaque à tecnologia do betão auto-compactável.

Parte dos trabalhos de investigação apresentados nesta dissertação surgem enquadrados no âmbito de dois projectos de investigação. Um dos projectos desenvolvido num Consórcio liderado pela MOTA-ENGIL e designado por *BACPOR – Desenvolvimento de uma Tecnologia Robusta para o Fabrico, Transporte e Aplicação do Betão Auto-Compactável*, com a participação de uma Instituição I&D (*FEUP/LABEST*) e empresas da Construção Civil nacional (*SIKA* e *MAPREL*), e que contou com o apoio da Agência de Inovação, S.A.. O segundo projecto, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e designado por “Controlled Permeability Formwork: Enhanced concrete durability”.

Atendendo ao interesse manifestado pela indústria Portuguesa na implementação desta nova tecnologia, coloca-se como um dos principais objectivos deste trabalho a aplicação e avaliação de metodologias simples de dimensionamento de composições de betão auto-compactável que permitam por um lado, a utilização da generalidade dos materiais presentes no mercado Português e, por outro lado, alcançar composições económicas e robustas. Para que projectistas, construtores e outros agentes da Construção Civil encarem com confiança a utilização do “novo” betão pretende-se demonstrar as vantagens da utilização do BAC e identificar as principais alterações a implementar no processo de fabrico, transporte e colocação, com vista a alcançar maiores benefícios técnicos e económicos.

As diferenças existentes entre o betão auto-compactável e o betão convencional, essencialmente no que respeita às proporções dos materiais constituintes na composição e ao processo de colocação, fazem prever alterações nas propriedades endurecidas do betão.

Assim sendo, outro dos objectivos deste trabalho, é aferir as propriedades mecânicas e de durabilidade do novo material, a curto e médio prazo, comparando-o com betão convencional.

Na perspectiva de poder contribuir para uma construção mais sustentável, realizando estruturas mais duráveis, será avaliada a utilização conjunta do betão auto-compactável com os sistemas de cofragem de permeabilidade controlada.

1.3 ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO

Atendendo ao conjunto de objectivos propostos para este trabalho, a dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, o primeiro dos quais é constituído pela presente introdução onde se pretende enquadrar e justificar o estudo desenvolvido bem como os seus objectivos. Nos parágrafos que se seguem é efectuada uma descrição sumária de cada um dos restantes capítulos.

No Capítulo 2 são apresentados os aspectos gerais que envolvem a tecnologia do betão auto-compactável. Inicialmente é exposto o conceito de betão auto-compactável e são descritas as principais motivações que levaram ao desenvolvimento desta tecnologia. Realiza-se uma breve resenha da evolução do conhecimento até aos dias actuais e são apresentadas as principais aplicações realizadas a nível mundial e nacional. De seguida sumarizam-se alguns dos aspectos críticos e as principais vantagens técnicas e económicas decorrentes da aplicação do betão auto-compactável na indústria da pré-fabricação e do betão pronto. Posteriormente são expostas as principais propriedades deste betão no estado fresco e os ensaios que permitem a sua avaliação, dando-se especial relevância às propriedades reológicas e respectivos ensaios. Ainda neste capítulo, são apresentados os materiais constituintes de uma composição de betão auto-compactável e seus efeitos nas propriedades do betão fresco e endurecido.

No Capítulo 3 discute-se a concepção de composições de betão auto-compactável, expondo-se os métodos desenvolvidos por diferentes autores e evidenciando as suas potencialidades e limitações. Tendo como ponto de partida o estado actual de conhecimento, são adoptadas duas abordagens distintas para definição de composições de betão auto-compactável, uma baseada num processo de tentativa-erro e a outra recorrendo à utilização de ferramentas estatísticas. As metodologias desenvolvidas serão aplicadas a duas composições com requisitos de desempenho e materiais constituintes distintos.

No Capítulo 4 e 5 descrevem-se duas experiências de implementação do betão auto-compactável na indústria da pré-fabricação, levadas a cabo na sequência dos estudos

laboratoriais. No âmbito destes ensaios à escala real foi avaliada a adequabilidade dos processos produtivos de amassadura, transporte e colocação correntes, à produção do betão auto-compactável, nomeadamente, os tempos de amassadura, os desvios ocorridos na pesagem dos materiais, correcção das quantidades dos agregados atendendo à variação do teor de humidade e as diferentes formas de transporte e descarga do betão. O betão auto-compactável produzido durante estes ensaios foi caracterizado no estado fresco, recorrendo aos mesmos ensaios utilizados durante o estudo laboratorial, o que permitiu observar as diferenças entre as misturas produzidas no laboratório e as produzidas nas condições reais de produção. Em cada ensaio à escala real, paralelamente à produção do BAC, foi produzido betão convencional, possibilitando uma comparação das diversas propriedades do betão endurecido, sobre provetes moldados e carotes retiradas de peças betonadas. Na experiência realizada na fábrica de pré-fabricação de Rio Maior foi aplicado o sistema de cofragem de permeabilidade controlada (CPF) em peças betonadas com BAC e com betão convencional com o objectivo de avaliar os benefícios produzidos pela sua utilização.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões a retirar do trabalho desenvolvido e, no seguimento da investigação realizada, são colocadas algumas questões de maior interesse a abordar em desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIA DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

2.1 INTRODUÇÃO

2.1.1 Conceito de betão auto-compactável

O betão tal como o conhecemos tem vindo a ser utilizado há 150 anos, contudo desde essa altura até hoje já sofreu algumas alterações importantes, principalmente na forma como é colocado. O betão após misturado é transportado e colocado dentro da cofragem através de um balde, de uma manga ou bombado e depois compactado e acabado. O processo de compactação é fundamental para que o betão preencha todos os espaços dentro da cofragem, envolva completamente a armadura e, no final, atinja os níveis de resistência e durabilidade requeridos. O ar é introduzido naturalmente no betão durante a mistura, e o propósito da compactação é expelir o ar e transformar o betão numa massa densa, uniforme e sem vazios. Uma compactação insuficiente poderá originar uma redução drástica do desempenho estrutural, sobretudo em termos de durabilidade, independentemente da qualidade da produção e da própria composição do material. Por um lado a resistência *in situ* pode não atingir o nível requerido, e por outro lado, o desempenho da estrutura ao longo do tempo é afectado, dado que o ingresso de agentes agressivos é facilitado reduzindo a durabilidade do betão. A resistência à penetração dos cloretos, resistência à acção do gelo/degelo ou a qualquer ataque químico são conseguidas à custa de uma densidade elevada do betão de recobrimento, pelo que as dificuldades de colocação do betão, como é o caso da compactação em zonas densamente armadas, reflectem-se de forma preponderante na durabilidade das estruturas.

A compactação do betão convencional é realizada através de vibração mecânica, cuja energia fluidifica o betão e permite que o ar seja libertado. O betão auto-compactável (BAC) surge para colocar inteiramente de parte o processo de compactação, sendo que muitas vezes é descrito como “tolerante”, porque não é sensível a variações da qualidade de vibração, e “silencioso” pela eliminação do ruído associado à compactação. A principal inovação do betão auto-compactável não reside no material em si, pois as matérias-primas são as mesmas de um betão convencional, mas nas suas características enquanto fresco (Nunes, 2001). Este betão, enquanto fresco, apresenta a capacidade de preencher todos os espaços no interior da cofragem, libertar o ar e envolver as armaduras, apenas por acção do peso próprio, mantendo a homogeneidade (Skarendahl e Petersson, 2001). A sua utilização resulta numa redução do custo global e em substanciais benefícios para a qualidade do produto final.

Uma definição mais precisa do BAC foi dada por *Okamura et al.* (2000), referindo que o betão auto-compactável de alto desempenho deve satisfazer três requisitos. Primeiro, o betão deve fluir livremente dentro da cofragem sem o uso de vibração. Segundo, os efeitos devidos ao calor de hidratação, endurecimento ou retracção por secagem devem ser mínimos. Terceiro, a permeabilidade do betão frente à penetração, de oxigénio, cloretos, dióxido de carbono e água deve ser mínima.

2.1.2 Origem, desenvolvimento e aplicações

2.1.2.1 Origem do betão auto-compactável

Depois de décadas em que o objectivo prioritário, no que se refere às estruturas de betão, consistia em melhorar a resistência do material, verifica-se actualmente que as questões relacionadas com a durabilidade são as que carecem de mais urgente resolução. No início dos anos 80 surgiu no Japão uma séria preocupação com a falta de durabilidade das estruturas de betão armado e pré-esforçado, defeitos como “ninhos de brita” e segregação, provocados na grande maioria das vezes por uma deficiente vibração, começavam a ser cada vez mais correntes. Esta falta de homogeneidade no betão, decorrente de uma diminuição da qualidade das técnicas de colocação e essencialmente, de compactação, foi atribuída ao decréscimo da mão-de-obra especializada (Okamura e Ouchi, 1999).

De salientar que o Japão, como país localizado numa zona de forte solicitação sísmica, utiliza nas suas construções uma grande densidade de armadura, o que causa uma

difficuldade acrescida nas operações de compactação. Para além da falta de mão-de-obra especializada, eram apontadas como fortes razões para a falta de durabilidade, a reduzida pormenorização dos desenhos estruturais conjugada com a falta de comunicação entre projectistas e construtores (Ozawa, Maekawa *et al.*, 1992). Como resposta a estas preocupações Okamura, em 1986, propôs duas soluções práticas para construir estruturas mais duráveis e seguras. A primeira solução consistia em estabelecer um conjunto de regras de dimensionamento e construção com vista a melhorar o desempenho das estruturas em termos de durabilidade, no que diz respeito a uma melhoria do desempenho do material “betão”, maior cuidado e preocupação na elaboração dos pormenores construtivos e um controlo mais rigoroso das técnicas de colocação e compactação utilizadas pelos trabalhadores. Em 1989 no “Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers (JSCE)” foi formalmente apresentado pelo sub-comité liderado pelo Professor Okamura as propostas “Proposed Recommendations on Durability Design for Concrete Structures”. A segunda solução prática consistia no desenvolvimento de uma nova tecnologia de betão sem necessidade de vibração, com a qual seria possível construir estruturas mais duráveis e seguras, mesmo com a intervenção de mão-de-obra pouco especializada (Ozawa, Maekawa *et al.*, 1992).

Em termos gerais, este novo material teria que satisfazer exigências em três estados: no estado fresco, nas idades jovens e no estado endurecido (Figura 2.1). No estado fresco o betão deveria ser capaz de alcançar todos os cantos da cofragem sem que fosse necessário qualquer tipo de vibração, sendo, para tal, fundamental que o betão apresentasse por um lado, elevada deformabilidade e por outro, elevada resistência à segregação. Nas idades jovens exigia-se que o betão exibisse uma elevada resistência à fendilhação, conseguida através de um baixo calor de hidratação e baixos valores de retracção plástica e autógena. O aparecimento destas fendas prejudica o desempenho estrutural e aparência da estrutura, e sobretudo promove a rápida entrada de agentes agressivos, acelerando a degradação da estrutura. Depois de endurecido, o betão deveria não só, apresentar uma resistência mecânica adequada, mas também uma elevada resistência ao ingresso de agentes potencialmente agressivos como o dióxido de carbono, oxigénio, iões cloretos e água, isto é, de baixa permeabilidade (Ozawa, Maekawa *et al.*, 1992).

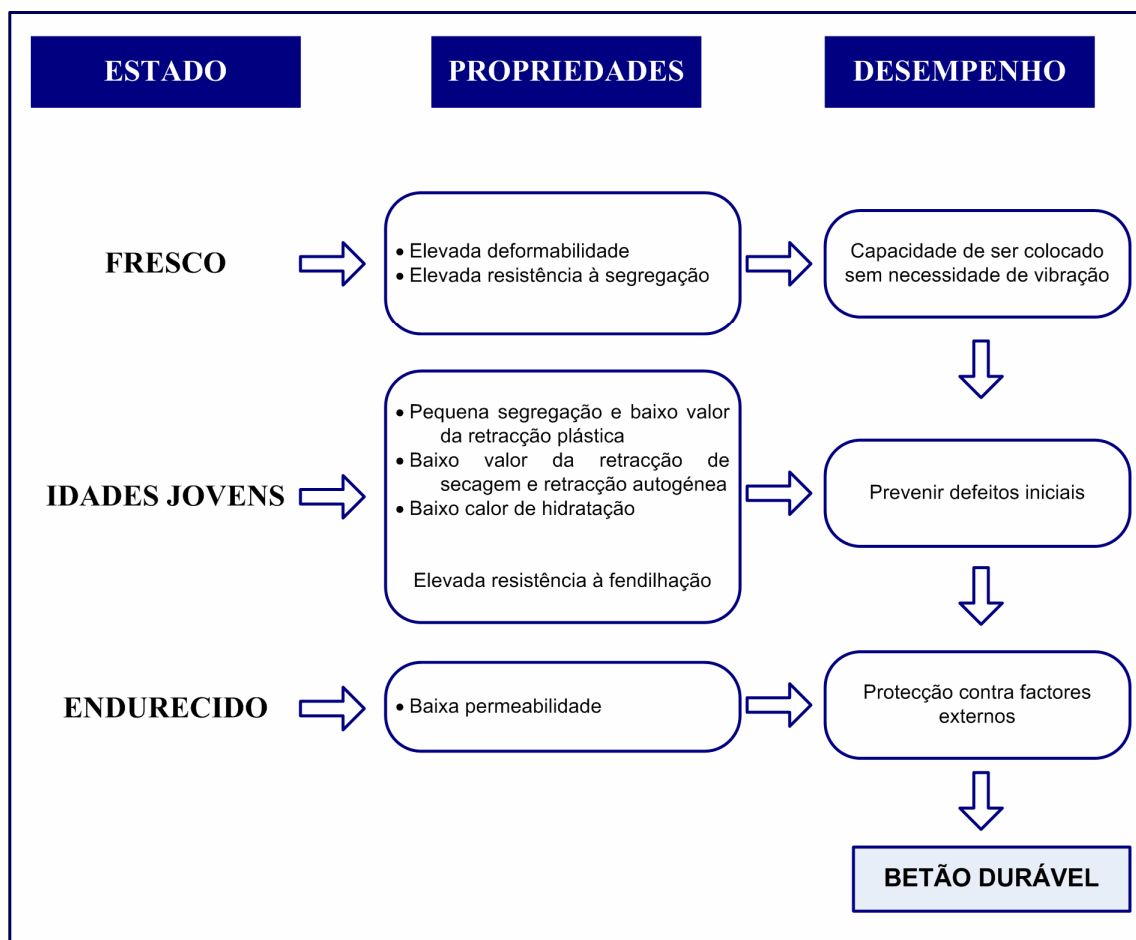


Figura 2.1 - Exigências requeridas ao BAC nos três estados: estado fresco, idades jovens e estado endurecido (Ozawa, Maekawa *et al.*, 1992)

Na Universidade de Tóquio e tendo por base investigações que se estavam a realizar um pouco por todo o mundo na área do comportamento de betão submerso, no estado fresco, foram levados a cabo estudos para desenvolver o “Self-Compacting Concrete (SCC)” (betão auto-compactável), que começaram por um estudo fundamental sobre a trabalhabilidade do betão, desenvolvido por *Ozawa* e *Maekawa* (Okamura e Ouchi, 1999).

O primeiro protótipo do SCC foi terminado em 1988, utilizando materiais existentes no mercado. Este protótipo, que se comportava satisfatoriamente no que respeita à retracção, calor de hidratação, densidade após cura e outras propriedades, foi inicialmente denominado por “high performance concrete” (betão de elevado desempenho). Contudo, sensivelmente ao mesmo tempo, o professor *Aitcin* definiu “high performance concrete” como um betão com elevada durabilidade conseguida à custa de uma razão água/cimento baixa. Desde então, a designação de “high performance concrete”

tem sido utilizada em todo mundo para designar betão de elevada durabilidade e/ou resistência. Assim sendo, os autores alteraram a designação do betão proposto para “self-compacting high performance concrete”, actualmente designado simplifadamente por “SCC-Self-Compacting Concrete” (BAC-Betão Auto-Compactável) (Okamura e Ouchi, 1999).

2.1.2.2 Desenvolvimento do betão auto-compactável

No ano seguinte à apresentação do protótipo do “self-compacting concrete”, realizou-se na Universidade de Tóquio uma demonstração, aberta a cerca de 100 investigadores e engenheiros, especialistas na área do betão, durante a qual se pode observar e avaliar o desempenho deste novo material no estado fresco e compará-lo com o betão utilizado convencionalmente. Depois do sucesso desta demonstração pública iniciou-se uma investigação intensiva, especialmente nos institutos de investigação de grandes companhias de construção japonesas e na Universidade de Tóquio. De salientar que estas grandes companhias de construção japonesas estão dotadas de excelentes laboratórios, empregando um grande número de investigadores, o que lhes permitiu desenvolver os seus próprios sistemas independentemente e aplicar de forma quase imediata o BAC em diversas estruturas.

O primeiro artigo sobre BAC foi apresentado em Janeiro de 1989 por *Ozawa* no “2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)”. Mais tarde, em Maio de 1992, a apresentação de *Ozawa* no “CANMET & ACI International Conference” que decorria em Istambul, permitiu acelerar a divulgação do conceito do BAC pelo mundo. Em 1994, depois do workshop sobre betão de elevado desempenho promovido pelo Prof. *Paul Zia* em Bangkok, o BAC tornou-se um ponto de interesse para investigadores e engenheiros por todo o mundo, que se interessavam pelos problemas de durabilidade e racionalização do processo construtivo. Complementarmente, em 1996 a “Ferguson Lecture by Okamura” na “ACI Fall Convention” que decorreu em New Orleans, divulgou o BAC na América do Norte. Como resultado destas comunicações iniciaram-se várias actividades de investigação (Okamura e Ouchi, 1999).

O primeiro workshop internacional sobre betão auto-compactável decorreu em Kochi no Japão em Agosto de 1998, durante o qual se decidiu criar uma rede de intercâmbio de informação “International Network for Self-Compacting Concrete (SCC-Net)”, usando um website na internet que entrou em funcionamento em Fevereiro de 1999 (<http://www.infra.kochi-tech.ac.jp/sccnet>).

Na Europa, em Janeiro de 1997, formou-se um comité técnico da RILEM “ The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures”, TC 174 Self-Compacting Concrete, com o objectivo de reunir, analisar e apresentar o estado da arte desta tecnologia emergente, assim como procurar ideias unificadas no que diz respeito à avaliação e ensaio das propriedades iniciais. Em Setembro de 1999, a RILEM organizou em Estocolmo o “First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete” durante o qual 13 países apresentaram um total de 67 comunicações. Aproximadamente 20 dessas comunicações reportam para aplicações práticas, o que confirma que a investigação realizada até então conduziu ao desenvolvimento de trabalhos de aplicação, assim como, o uso na construção corrente.

Em Portugal, o primeiro artigo onde é referido o conceito desta nova tecnologia e o interesse da sua aplicação, foi apresentado em 1999 nas “3^{as} Jornadas de Estruturas de Betão” por *David* (David, 1999) e a primeira experiência em obra foi apresentada por *Sampaio* (Sampaio, 2000) no “1º Congresso Nacional da Indústria de Pré-Fabricação em Betão”.

Recentemente decorreu em Chicago, nos Estados Unidos, o “Forth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete”, de 30 de Outubro a 2 de Novembro de 2005, perspectivando-se já o “Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete” a realizar na Bélgica. No que respeita a recomendações europeias, foi publicado em Maio de 2005 “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete–Specification, Production and Use”, preparadas por um conjunto de cinco federações europeias dedicadas à promoção de materiais avançados e de sistemas para o uso do betão.

2.1.2.3 Aplicações práticas do betão auto-compactável

A primeira aplicação de BAC ocorreu num edifício em Junho de 1990 no Japão, e em 1991 foi utilizado nas torres de uma ponte atirantada. Posteriormente, em 1992 igualmente no Japão, foi aplicado betão auto-compactável leve na viga principal de uma ponte atirantada e, desde então o uso de BAC nas estruturas tem aumentado gradualmente. Actualmente as razões que motivam o emprego desta nova tecnologia prendem-se com a redução do período de construção, a garantia de uma boa compactação em toda a estrutura, em particular em zonas de difícil acesso, e a eliminação do ruído devido à vibração, especialmente na pré-fabricação (Okamura e Ouchi, 1999).

Um exemplo de destaque, onde a aplicação do betão auto-compactável se tornou muito vantajosa, reduzindo significativamente o tempo de construção, foi a ponte suspensa

de Akashi-Kaikyo colocada em funcionamento em Abril de 1998 (Figura 2.2a) (Kashima, Kanazawa *et al.*, 1998). Outro exemplo de aplicação com relevância foi a utilização do BAC nas paredes de um tanque pré-esforçado destinado ao armazenamento de gás natural liquefeito (LNG – Liquefied Natural Gas) com uma capacidade de 180000kl (Figura 2.2b). A escolha por este tipo de betão ficou a dever-se essencialmente a três razões. Em primeiro lugar, o uso do betão auto-compactável permitia aumentar a altura de descarga do betão, que, no caso do betão convencional, é condicionada pelo trabalho de compactação e, desta forma, reduzir o número de fases de betonagem de 14 para 10. Em segundo lugar, a inexistência dos trabalhos de vibração reduzia a necessidade de mão-de-obra para os trabalhos de betonagem, sendo que, dos 150 trabalhadores geralmente necessários para a construção dos tanques de betão convencional apenas seriam requeridos 50. Por último, a utilização desta nova tecnologia permitia reduzir significativamente o período de construção, de 22 para 18 meses (Kitamura, Nishizaki *et al.*, 1998).

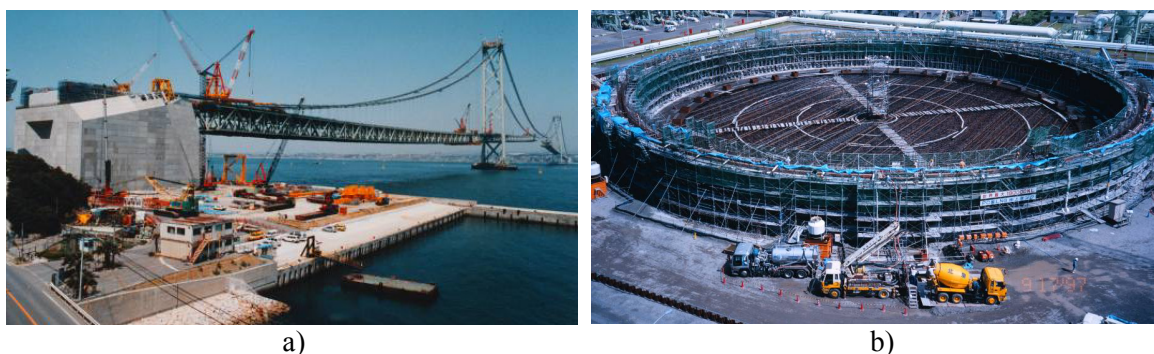


Figura 2.2 – a) Bloco de ancoragem da ponte de Akashi-Kaikyo, betonado com BAC; b) Betonagem com BAC de um tanque destinado ao armazenamento de gás natural liquefeito

Da mesma forma, na construção de túneis, onde para além dos aspectos ligados à produtividade e ao ambiente de trabalho se impõem sérias dificuldades de colocação e compactação do betão, a aplicação do betão auto-compactável tornou-se uma solução de inegáveis vantagens.

No campo da edificação, a utilização de BAC iniciou-se mais tarde, embora nestes últimos anos tenha vindo a desenvolver-se de forma considerável. As vantagens económicas do emprego desta nova tecnologia em construções correntes tem gerado alguma controvérsia, mas quando construtores e produtores de betão racionalizarem todo o processo construtivo com vista à sua aplicação, as vantagens serão evidentes.

Contudo, a aplicação do BAC não se ficou pela indústria do betão pronto, a sua implementação revelou-se particularmente adequada para os elementos pré-fabricados os

quais pequenos defeitos originados por deficiente compactação afectam bastante a sua funcionalidade. O BAC apresenta-se como uma excelente opção para o caso de peças com geometrias complicadas, secções muito estreitas ou com elevada densidade de armadura. Um dos exemplos de sucesso de aplicação desta nova tecnologia refere-se à construção de aduelas para revestimento de túneis numa indústria da pré-fabricação japonesa (Figura 2.3), onde para além de uma melhoria da qualidade dos produtos e do ambiente de trabalho se pode observar uma maior racionalização da produção e redução dos custos globais. Na pré-fabricação o SCC permite o desenvolvimento de métodos de produção mais racionais, acelerar o processo construtivo e reduzir os custos de betonagem, tornando-a numa indústria muito mais competitiva (Uno, 1998).



Figura 2.3 – Fabrico de aduelas para revestimento de túneis

Em Portugal, e apesar do betão auto-compactável se posicionar como o provável substituto do betão convencional na indústria da construção, a sua implementação ainda se encontra numa fase embrionária. Engenheiros e construtores mostram-se bastante cépticos quanto à sua utilização, estando a sua aplicação limitada a projectos-piloto ou a obras muito especiais. Para que a implementação desta tecnologia se dê de forma sustentada é necessário realizar um investimento significativo em termos de “know-how”, procedimentos de produção e controlo de qualidade, formação de recursos humanos e actualização das regulamentações actuais.

Uma das primeiras aplicações de BAC em Portugal realizou-se na Etar da Madalena em Vila Nova de Gaia, onde foi betonado um reservatório circular (Figura 2.4). O reservatório circular com 18m de diâmetro, 14m de altura e 30cm de espessura e com

grande densidade de armadura, correspondendo a um volume de betão de 220m^3 , foi betonado num única vez, fazendo-se a descarga do betão através de uma manga. Exigia-se um betão com uma classe de resistência C30/37 e estanque à água, isto é com uma permeabilidade à água bastante reduzida (Nunes, Leite *et al.*, 2002). Após o ensaio de carga realizado nos reservatórios, e ao contrário do que aconteceu com o reservatório betonado com betão auto-compactável, parte dos reservatórios betonados com betão convencional foram sujeitos a obras de reparação para que fosse garantida a sua estanquidade. Na origem desta falta de estanquidade esteve a má compactação, problemas de segregação e uma micro-fendilhação acentuada.



Figura 2.4 – Reservatório da Etar da Madalena betonado com BAC

Apesar da investigação já desenvolvida em volta desta tecnologia emergente, o uso industrial do BAC está ainda numa fase muito inicial. A existência de estudos credíveis e de projectos que demonstrem as suas vantagens técnicas e económicas são essenciais para a adopção desta nova tecnologia por parte da indústria da construção. A rapidez com que o BAC vai ser adoptado depende do esforço promocional das indústrias de cimento, betão-pronto e pré-fabricação, assim como da confiança de engenheiros e empreiteiros em especificarem e usarem esta nova categoria de “high-performance concrete” (Khayat, Hu *et al.*, 1999). Quando o betão auto-compactável começar a ser adoptado num largo número de aplicações, de tal forma que seja encarado não como um betão especial, mas sim, como um betão corrente, então o desenvolvimento desta nova tecnologia terá realmente contribuído para a construção de estruturas mais duráveis, estruturas com um tempo de vida útil muito maior.

2.1.3 Vantagens técnicas e económicas

Na análise das perspectivas de mercado para o uso do BAC, além de identificar as vantagens técnicas e económicas que advêm da sua utilização é importante reconhecer os potenciais beneficiários. As diversas partes envolvidas no processo construtivo podem beneficiar da utilização deste material, nomeadamente, fornecedores de materiais, empreiteiros, engenheiros, arquitectos, donos-de-obra e os utilizadores finais (Nunes, 2001).

A utilização deste material revoluciona o processo construtivo das estruturas de betão, permitindo um aumento de produtividade através de uma redução de custos por eliminação de parte da mão-de-obra, da maior facilidade de colocação e da redução no período de construção.

Ao utilizar o BAC as melhorias do ambiente de trabalho são igualmente substanciais, quer a nível humano quer a nível da própria empresa construtora. Ao eliminar a necessidade de vibração, extingue-se a principal fonte de ruído durante a construção em betão, o que promove um ambiente de trabalho mais agradável e reduz a necessidade de protecção do aparelho auditivo. Uma outra consequência da vibração prende-se com as perturbações na circulação sanguínea dos operadores provocadas pela utilização dos vibradores de agulha. Adicionalmente, o esforço físico exigido aos trabalhadores na movimentação das mangueiras da bombagem ou na deslocação do equipamento de vibração é igualmente muito significativo. Ao mesmo tempo uma melhoria nas condições de trabalho também resulta numa série de vantagens económicas para a empresa. De facto pode-se verificar uma diminuição dos custos ligados com a saúde dos trabalhadores e do número de reformas antecipadas, possibilidade de alargamento do horário de trabalho, condicionado por uma limitação legal relativamente ao tempo que as pessoas podem estar sujeitas a um nível de ruído elevado e maior produtividade inerente à existência de melhores condições de trabalho.

A razão prioritária para o desenvolvimento do betão auto-compactável esteve relacionada com a falta de durabilidade das estruturas, causada essencialmente pela falta de homogeneidade. Uma estrutura realizada com BAC, quando comparada com uma de betão convencional é potencialmente mais homogénea, uma vez que não existe a variação inerente à compactação por vibração, isto é, há uma redução da influência do factor humano na qualidade da betonagem. Por outro lado a grande necessidade de finos exibida por este betão, para que sejam garantidas as propriedades do betão fresco, poderá potenciar um melhor desempenho em termos de durabilidade. A incorporação de adições minerais mais finas que o cimento, aumenta a compacidade da pasta, tornando a microestrutura do

BAC menos permeável à entrada de agentes agressivos e consequentemente os processos de deterioração do betão ocorrem de uma forma muito mais lenta. Estas adições podem ser sub-produtos de outras indústrias, como as cinzas volantes e as escórias de alto-forno, com vantagens claras do ponto de vista ambiental.

No que se refere ao projecto de estruturas, este material permite maior flexibilidade no que respeita à disposição da armadura e à concepção de estruturas com geometrias mais elaboradas e secções mais finas.

Um importante critério para uma implementação bem sucedida de qualquer nova tecnologia é a necessidade de oferecer ao consumidor final melhor desempenho a mais baixo custo. O custo que advém da parcela dos materiais na fabricação de um BAC, é na maioria dos casos, superior ao custo para a fabricação do correspondente betão convencional. Mas, atendendo a que esta nova tecnologia promove um aumento da produtividade, uma melhoria no ambiente de trabalho, um aumento na qualidade do betão endurecido e um aumento no tempo de serviço das estruturas, ao investimento inicial realizado com os materiais corresponderá de facto a um produto final mais económico.

A) Vantagens na pré-fabricação

Na indústria de pré-fabricação a central de fabrico do betão e o local da aplicação estão muito próximos, sendo mais fácil controlar e garantir a qualidade do betão fresco, o que constitui uma vantagem adicional para a introdução, com sucesso, do BAC. De entre as vantagens mais específicas que advém da utilização de BAC na pré-fabricação são de destacar: i) a possibilidade de construir elementos de geometria complexa e de elevada densidade de armadura; ii) um melhor acabamento da superfície, eliminando a necessidade de efectuar reparações na superfície após a desmoldagem; iii) redução do consumo de energia e uma redução drástica do ruído no interior da fábrica devido à eliminação da vibração; iv) aumento do tempo de vida útil das cofragens; v) maior flexibilidade na produção e diversidade dos elementos produzidos; vi) melhoria das condições de trabalho dado que as tarefas são aligeiradas.

B) Vantagens no betão pronto

Dos aspectos específicos mais ligados à indústria do betão-pronto são de referir: i) a redução do ruído no local da construção, particularmente importante no interior de zonas urbanas, e a consequente maior flexibilidade no planeamento dos trabalhos; ii) o aligeiramento das tarefas envolvidas nos trabalhos de betonagem, o que pode atrair para a

actividade, jovens que ingressem no mercado de trabalho; iii) redução no tempo de construção, particularmente, nas zonas de difícil acesso, secções congestionadas, com elevada percentagem de armadura e nos trabalhos de reabilitação.

No caso do betão pronto, como grande parte das aplicações são realizadas com recurso à bombagem, o emprego de um betão que possui a capacidade de se mover no interior das cofragens reduz a necessidade de deslocar as linhas de bombagem e reduz o número de bombas e operadores de bomba necessários, quando comparado com a utilização de betão pronto convencional (Figura 2.5). Por outro lado a utilização do BAC permite a redução da pressão de bombagem, o que é benéfico em termos de desgaste do equipamento, ou por outro lado, permite o uso de bombas menos potentes e, no caso de longas distâncias, evita o uso de bombas suplementares.



Figura 2.5– Betonagem de uma laje com BAC utilizando apenas uma saída de betão (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005)

C) Aspectos críticos

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas, esta nova tecnologia, aplicável com facilidade numa dada central, pode não o ser noutra central de produção de betão. O sucesso na produção de BAC com características constantes exige uma central de produção com capacidade para controlar e manter os factores de produção, dos quais os mais críticos são o teor de água e o teor de finos. Visto tratar-se ainda de uma novidade, sob diferentes aspectos, a abordagem experimental assume uma importância especial, exigindo um contacto mais estreito entre o laboratório e a central de produção. Por outro lado, é fundamental a formação dos operários envolvidos nas diversas fases da produção.

Salienta-se ainda que o custo global das construções nem sempre pode ser reduzido, excepto em construções de larga escala onde o factor tempo seja preponderante, e isto porque todo o processo construtivo se baseia fortemente na necessidade de vibração. Para que o BAC se torne competitivo ao nível das estruturas mais correntes, é necessário que haja uma adaptação ao nível do projecto e construção de estruturas, para que por um lado, se possa tirar o máximo partido desta tecnologia e por outro, se torne o processo construtivo mais racional. A implementação do betão auto-compactável permite caminhar para a racionalização da construção em betão podendo ser desenvolvido um novo sistema construtivo, incluindo a cofragem, armadura e a própria concepção estrutural (Okamura e Ouchi, 1999)

Um outro entrave à introdução do BAC é o carácter conservador que caracteriza a indústria da construção aliado a um aumento do grau de exigência por parte dos donos-de-obra quando se trata de aplicar novas tecnologias. Torna-se importante desenvolver e difundir estudos e projectos visando a produção, modo de colocação e características mecânicas e de durabilidade do BAC, para seja possível a utilização com confiança desta nova tecnologia, por parte dos engenheiros, empreiteiros, donos-de-obra e outros agentes da construção.

2.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL FRESCO

2.2.1 Propriedades do betão fresco

As propriedades no estado fresco do BAC, quando comparadas com as do betão convencional, estão claramente relacionadas com o que pode ser descrito como auto-compactável. Alguns investigadores estão a tentar relacionar a auto-compactabilidade do betão com as suas propriedades reológicas de forma a obter parâmetros com uma justificação mais racional e científica. Esta propriedade é, em termos mecânicos, relacionada com a reologia do betão fresco, enquanto que em termos práticos pode ser relacionada com os parâmetros de trabalhabilidade (Skarendahl e Petersson, 2001).

2.2.1.1 A trabalhabilidade do BAC: propriedades de auto-compactabilidade

Em termos de trabalhabilidade de um BAC, a auto-compactabilidade exige que o betão fresco exiba uma elevada fluidez com suficiente viscosidade e coesão entre os

componentes, a fim de garantir um fluxo contínuo e uniforme, sem exibir segregação e sem que ocorra o bloqueio do betão entre as armaduras.

A auto-compactabilidade, enquanto propriedade do betão no estado fresco, pode ser caracterizada, fundamentalmente, por três requisitos principais: capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos (Skarendahl e Petersson, 2001).

1) Capacidade de enchimento

A capacidade de enchimento adequada é conseguida através de um equilíbrio entre a capacidade de deformação, o escoamento em termos da distância alcançada pelo betão desde o ponto de descarga, e a velocidade de deformação, velocidade com que o betão é capaz de se mover.

No quadro que se segue (Quadro 2.1) são referidas de forma sintética as propriedades que o betão deve exibir assim como as acções a realizar com vista a obter uma adequada capacidade de enchimento.

Quadro 2.1 - Propriedades do betão e acções a realizar de forma a obter uma adequada capacidade de enchimento (Skarendahl e Petersson, 2001)

Propriedades do Betão	Acções a realizar	Observações
Elevada deformabilidade da pasta	Adicionar superplastificante	<ul style="list-style-type: none"> O superplastificante aumenta a capacidade do betão se deformar; A introdução de superplastificante aumenta a capacidade de deformação mas reduz também a viscosidade, podendo ocorrer riscos de segregação; Uma razão água/finos baixa limita a deformabilidade da pasta.
	Controlar a razão água/finos	
Reduzido atrito inter-partículas	Baixar o volume de agregado grosso (aumentar o conteúdo em pasta)	<ul style="list-style-type: none"> A capacidade e velocidade de deformação do betão aumentam com a redução do atrito entre as partículas sólidas.
	Optimizar a granulometria da fase sólida	

2) Resistência à ocorrência de segregação

A segregação do betão fresco caracteriza-se pela falta de homogeneidade na distribuição dos seus materiais constituintes, o que influencia a distribuição das

propriedades do betão. O betão auto-compactável não deve exibir nenhum dos seguintes tipos de segregação, tanto em repouso como em movimento: exsudação (segregação entre sólidos e água), segregação da pasta e agregados, segregação do agregado grosso originando o bloqueio e não uniformidade da distribuição dos poros de ar.

No Quadro 2.2 são referidas, de forma sintética, as propriedades que o betão deve exibir assim como as acções a realizar com vista a obter uma elevada resistência à ocorrência de segregação.

Quadro 2.2 - Propriedades do betão e acções a realizar de forma a obter uma elevada resistência à ocorrência de segregação (Skarendahl e Petersson, 2001)

Propriedades do Betão	Acções a realizar	Observações
Reduzida segregação	Limitar o conteúdo de agregado grosso	<ul style="list-style-type: none"> O aumento da resistência à segregação não deve ser conseguido à custa de um aumento do atrito inter-partículas, uma vez que limita a capacidade de deformação e aumenta o risco de bloqueio; Para reduzir a separação entre agregados o ideal é aumentar a coesão da pasta, o que é conseguido reduzindo-se a razão água/finos.
	Reduzir a dimensão máxima do agregado	
	Baixar a razão água/finos	
	Introduzir um agente de viscosidade	
Reduzida exsudação	Baixar o conteúdo de água	<ul style="list-style-type: none"> Para minimizar a exsudação é fundamental reduzir a quantidade de água livre na composição.
	Baixar a razão água/finos	
	Utilizar materiais finos com maior superfície específica	
	Introduzir um agente de viscosidade	

3) Capacidade de passar entre espaços estreitos

A capacidade de passar entre espaços estreitos, importante nos casos onde exista espaços apertados na cofragem ou congestionamento da armadura, relaciona-se com a possibilidade de ocorrer bloqueio dos agregados grossos.

No quadro que se segue (Quadro 2.3) são referidas, de forma sintética, as propriedades que o betão deve exibir assim como as acções a realizar com vista a aumentar a capacidade de passar entre espaços estreitos.

Quadro 2.3 - Propriedades do betão e acções a realizar de forma a aumentar a capacidade de passar entre espaços estreitos (Skarendahl e Petersson, 2001)

Propriedades do Betão	Acções a realizar	Observações
Elevada coesão	Baixar a razão água/finos	<ul style="list-style-type: none"> O risco de bloqueio aumenta se a composição possuir uma tendência para a segregação (baixa coesão)
	Introduzir um agente de viscosidade	
Características do agregado grosso compatíveis com o espaçamento dos varões	Diminuir o volume de agregado grosso	<ul style="list-style-type: none"> Os obstáculos provocam uma alteração do percurso das partículas provocando contactos instantâneos entre elas, com a possibilidade de ocorrer bloqueio
	Diminuir a dimensão máxima dos agregados	

2.2.1.2 Reologia, uma ferramenta para caracterizar o betão auto-compactável

Reologia (*rheos* = *fluir* e *logos* = *estudo*) é a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais quando submetidos a uma determinada tensão ou solicitação mecânica externa, ao longo de um determinado tempo. O comportamento reológico dos materiais é usualmente descrito por expressões matemáticas que estabelecem relações entre a tensão de corte aplicada (τ) e a respectiva taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), atendendo às suas variações ao longo do tempo. Estas relações, conhecidas como relações do estado reológico, tornam-se mais abrangentes e complexas à medida que os materiais se desviam do comportamento de fluido perfeito (fluido Newtoniano). Segundo *Newton*, um líquido perfeito é aquele cuja taxa de deformação é proporcional à tensão de corte aplicada, durante o tempo em que esta é aplicada. Se uma força de corte “F” é aplicada a um fluido, tal como é ilustrado na Figura 2.6a, criam-se lâminas paralelas de líquido separadas por uma distância infinitesimal “dy”, que se deslocam na mesma direcção mas a velocidades distintas “ $dv = V_1 - V_2$ ” (Figura 2.6b). Em virtude da diferença de velocidades, o fluido entre as lâminas é submetido a uma taxa de deformação equivalente ao gradiente de velocidade “ $\dot{\gamma} = dv/dy$ ”. A constante de proporcionalidade que relaciona a tensão de corte aplicada com o gradiente de velocidades (taxa de deformação) chama-se viscosidade “ η ”, que para o caso de um fluido newtoniano, pode ser descrita pela Equação (2.1).

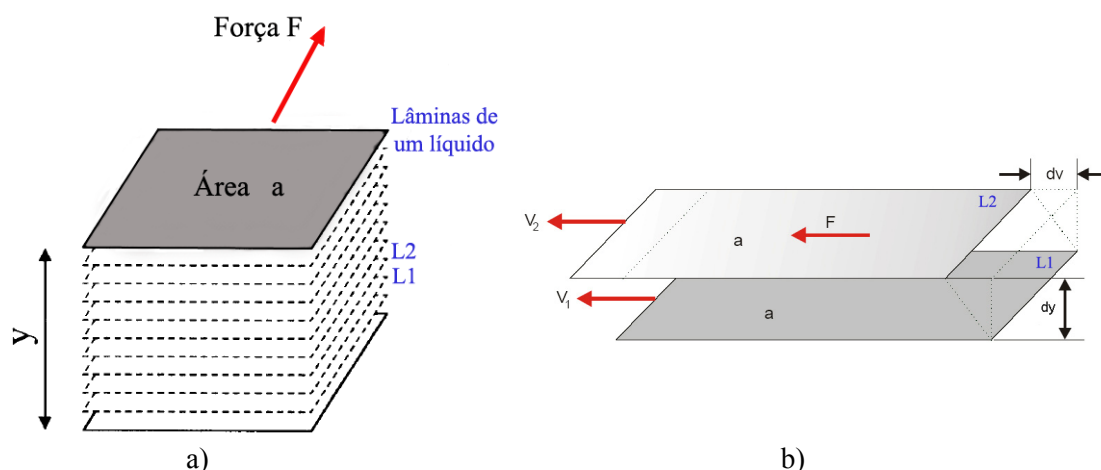


Figura 2.6 – a) Representação esquemática do escoamento laminar de um fluido (Ferraris, 1999a);
b) Representação esquemática do escoamento de um fluido segundo o modelo de Newton (Street, Watters *et al.*, 1996)

$$\tau = \frac{F}{a} = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \gamma \quad (2.1)$$

As propriedades reológicas determinam o comportamento do betão fresco durante a colocação e consolidação. O betão no estado fresco pode ser descrito como uma suspensão de partículas, apesar de bastante complexa, uma vez que possui uma granulometria extensa de partículas e apresenta propriedades que variam com o tempo devido às reacções químicas. Na realidade o betão pode ser considerado uma suspensão de partículas sólidas (agregados) num líquido viscoso (pasta de cimento), que por sua vez é ele próprio composto por partículas (grãos de cimento) suspenso num líquido (água) (Ferraris, 1999b). O seu comportamento reológico no estado fresco pode ser caracterizado através da “tensão de cedência” e “viscosidade plástica”, definidas geralmente de acordo com o modelo de *Bingham*, $\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \gamma$. De acordo com este modelo, para se iniciar o movimento é necessário aplicar uma dada tensão de corte inicial (τ_0 - tensão de cedência), seguido pelo aumento da tensão de corte aplicada a uma taxa de deformação crescente. O declive da recta corresponde à viscosidade plástica (η_{pl}) (David, 1999). Alguns autores defendem que o modelo de *Bingham*, constitui uma aproximação simplificada ao verdadeiro comportamento do betão, já que uma análise mais atenta das curvas de escoamento revelam que o BAC apresenta um comportamento dependente da tensão aplicada, dilatante (*shear-thickening*) ou pseudoplástico (*shear-thinning*) (Ferraris, 1999a; Wallevik, 2003a). A presença de partículas com elevada rugosidade superficial ou formatos assimétricos, distribuição granulométricas pouco contínuas ou até mesmo fenómenos de segregação dão origem a um comportamento dilatante que se caracteriza pelo aumento da viscosidade do

fluido à medida que se eleva a tensão de corte. Por outro lado, a pseudoplasticidade ocorre quando a viscosidade do fluido diminui com o aumento da tensão de corte, podendo ser causada pelo facto das partículas da suspensão se organizarem de tal forma que adquirem como orientação preferencial a direcção de aplicação da tensão de corte (Wallevik, 2003a). De uma forma mais rigorosa poder-se-á dizer que o comportamento do BAC no estado fresco é descrito pelo modelo de *Herschel-Bulkley*, $\tau = \tau_0 + \eta_H \dot{\gamma}^p$, para um valor de $p > 1$ caso apresente um comportamento dilatante e para um valor de $p < 1$ caso apresente um comportamento pseudoplástico (Ferraris, 1999a). Na Figura 2.7 é apresentado um gráfico da tensão de corte em função da taxa de deformação, onde se representa o comportamento reológico de um fluido *Newtoniano* e os modelos reológicos de *Bingham*, de *Herschel-Bulkley* para $p > 1$ e *Herschel-Bulkley* para $p < 1$.

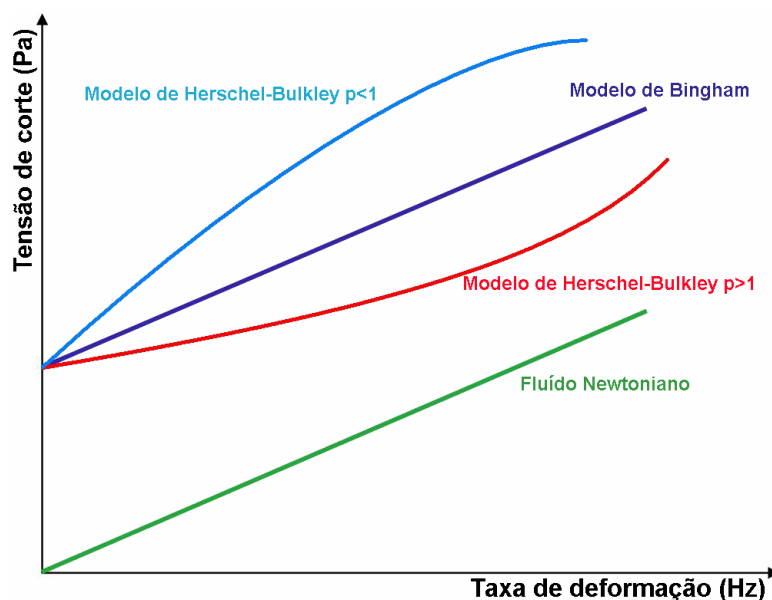


Figura 2.7– Comportamento reológico de um fluido *Newtoniano* e modelos reológicos de *Bingham* e de *Herschel-Bulkley* para $p > 1$ e para $p < 1$ (Bartos, 1992)

Apesar da equação de *Herschel-Bulkley* fornecer valores mais rigorosos a sua utilização exige a determinação de três parâmetros que não podem ser medidos independentemente, ao contrário do que acontece na equação de *Bingham* com a tensão de cedência e a viscosidade. Por este motivo e por se considerar que constitui uma boa aproximação do comportamento do BAC no estado fresco, o modelo de *Bingham* é o mais correntemente utilizado (Ferraris, 1999a).

Durante a concepção de uma composição de betão auto-compactável, a deformabilidade e a resistência à segregação são propriedades que devem ser balanceadas

de forma a obter um betão com as características adequadas. Supondo que o comportamento do betão responde ao modelo de *Bingham*, a elevada deformabilidade do BAC depende essencialmente de uma tensão de cedência baixa (τ_0), necessária para que o betão comece a fluir, e a resistência à segregação depende de uma adequada viscosidade plástica (η_{pl}) (Figura 2.8). A gama de valores adequada para a viscosidade plástica depende bastante das propriedades dos materiais (densidade, forma das partículas, dimensão e distribuição granulométrica) e do tipo de aplicação, nomeadamente, da técnica de colocação do betão (da taxa de deformação máxima expectável) e do tipo de configuração da estrutura que se pretende construir (Skarendahl, 1998). Observando a Figura 2.8 é possível comparar o campo reológico do betão auto-compactável relativamente a outros tipos de betão.

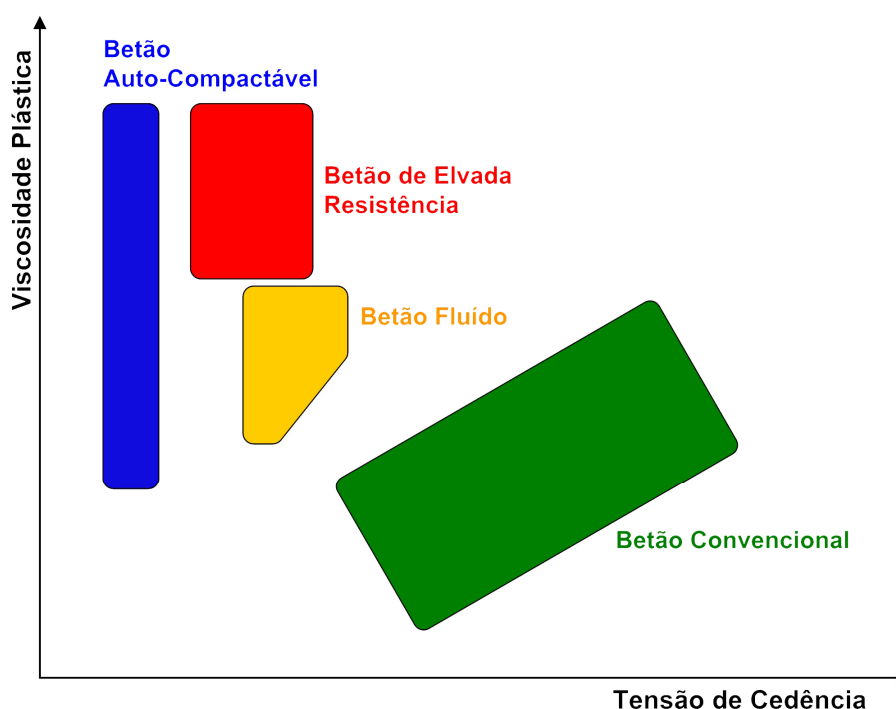


Figura 2.8– Propriedades reológicas de vários tipos de betão (Noguchi e Mori, 1998)

O desenvolvimento de composições de betão auto-compactável exige um controlo apertado das suas propriedades reológicas críticas, tensão de cedência e viscosidade, mas também da tixotropia. A tixotropia é uma propriedade reológica dependente do tempo, que se caracteriza por uma diminuição da viscosidade sobre uma tensão de corte constante, seguida de uma recuperação gradual quando a tensão é retirada (Billberg e Österberg, 2001). Numa perspectiva da microestrutura, a tixotropia de um material representa a capacidade natural de estabelecer uma rede de ligações interpartículas, ligações essas que

tendem a destruir-se quando aplicada uma tensão de corte e tendem a restabelecer-se quando cessa a aplicação dessa tensão. As propriedades reológicas de um material tixotrópico são dependentes da história de tensões, o que torna as medições da tensão de cedência e viscosidade extremamente dependentes do protocolo de medição (Toussaint, Juge *et al.*, 2001). O comportamento tixotrópico do betão auto-compactável influencia aspectos importantes na produção, tais como a geometria da estrutura, a pressão sob as cofragens e a qualidade da superfície, mas também nas técnicas de colocação do betão.

2.2.2 Ensaio para avaliação das propriedades do betão no estado fresco

Uma composição de betão só pode ser classificada como betão auto-compactável se forem cumpridos três requisitos mínimos: capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar em espaços estreitos. A avaliação e medição destes parâmetros coloca-se fora do âmbito dos ensaios normalizados para a avaliação da trabalhabilidade do betão convencional, baseada essencialmente numa medida da consistência no ensaio de abaixamento utilizando o cone de *Abrams*. Na realidade não existem, nas actuais normas, ensaios que permitam avaliar as propriedades chave do BAC, no estado fresco. A actual norma europeia EN 206 (2000) indica diferentes ensaios para avaliação da trabalhabilidade de betão com necessidade de vibração, referindo que para betões de elevada trabalhabilidade deva ser usado o ensaio de espalhamento. Após algumas alterações, este ensaio tem vindo a ser utilizado para avaliar a capacidade de deformação do BAC (*Slump flow test*), contudo ainda não existem ensaios normalizados que permitam avaliar quantitativamente a resistência à segregação (estabilidade da composição) e a capacidade de passar entre espaços estreitos (resistência ao bloqueio). No entanto, as recentes recomendações europeias, publicadas em Maio de 2005, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use” (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005), foram apresentadas em formato de projecto de norma, pretendendo desta forma facilitar a regulamentação para aplicação do betão auto-compactável a nível europeu.

Para avaliar a auto-compactabilidade, investigadores e outros utilizadores deste material, têm vindo a desenvolver ensaios específicos ou a modificar os ensaios convencionais. A forma como surgiu o BAC, no qual as grandes empresas, no Japão, e investigadores por todo o mundo desenvolveram isoladamente os seus próprios métodos de ensaio, conduziu ao aparecimento de ensaios diferenciados para verificação de conformidade de parâmetros específicos (Bartos e Grauers, 1999). Estes ensaios ainda não

foram harmonizados nem normalizados, visto que nenhum ensaio isolado ou uma combinação de ensaios encontrou uma aprovação universal e a maioria apresenta algumas limitações. Da mesma forma, nenhum ensaio isolado é capaz de avaliar de forma fiável as três propriedades de auto-compactabilidade do betão. Pretende-se que estes ensaios, por um lado, permitam uma avaliação rápida, fácil e fiável das propriedades chave do BAC e por outro lado, apresentem sensibilidade suficiente para a especificação de diferentes composições de BAC, com parâmetros ajustados a uma determinada composição.

As propriedades do BAC devem ser avaliadas de formas distintas dependendo se o objectivo a que se destina é a selecção de materiais, a definição da composição, o controlo da produção na central ou a verificação da conformidade no local da construção. No caso do objectivo ser a selecção de materiais ou a definição da composição, geralmente realizadas em laboratório, exigem-se equipamentos precisos ou modelos de elementos estruturais quase a uma escala real. Caso se trate de uma utilização *in situ*, onde o objectivo é o controlo da produção na central ou a verificação da conformidade no local da construção, os equipamentos devem ser robustos e mais simplificados.

Na realidade a forma mais precisa de descrever o comportamento do betão fresco é através de ensaios reológicos. Este tipo de ensaios, e ao contrário do que acontece com os ensaios de trabalhabilidade, permitem caracterizar de forma quantitativa o comportamento do material (através da tensão de cedência e da viscosidade) e por outro lado dependem menos da experiência e habilidade do engenheiro para a sua realização e interpretação. Contudo, os ensaios reológicos não têm uma leitura directa para o uso na construção civil, significando por isso uma utilização mais ligada à concepção das composições. Atendendo às vantagens e limitações destes ensaios, torna-se fundamental para o prosseguir do desenvolvimento do BAC, correlacionar os parâmetros obtidos nos ensaios reológicos com os ensaios de trabalhabilidade, mais indicados para o uso contínuo e em obra.

Em seguida, apresenta-se o conjunto de ensaios, reológicos e de trabalhabilidade, utilizados no decorrer deste trabalho para a concepção e caracterização de composições de BAC no estado fresco. Nos ensaios reológicos é dado maior destaque aos ensaios em pastas, uma vez que foram os ensaios utilizados para avaliação do comportamento de alguns constituintes do BAC. Sucintamente são referidas as suas principais vantagens e limitações relativamente aos ensaios reológicos no betão. No que diz respeito aos ensaios de trabalhabilidade, são referidos os ensaios mais vulgarmente utilizados para caracterização do BAC no estado fresco e relativamente aos quais existem indicações sobre os equipamentos, procedimento de ensaio e os valores adequados para os resultados.

2.2.2.1 Ensaios reológicos

A caracterização do comportamento reológico do betão visa fundamentalmente estudar a evolução da viscosidade e da tensão de cedência em função de outras variáveis, como o tempo ou a temperatura. A avaliação do comportamento reológico constitui um dado valioso para avaliação da trabalhabilidade, contudo não descreve todos os aspectos da trabalhabilidade de um BAC (Skarendahl, 1998). O equipamento utilizado nestes ensaios, o reómetro, envolve um mecanismo complexo e preciso de funcionamento, devendo apresentar dimensões suficientemente grandes para se poder considerar o BAC como um fluido homogéneo. Dada as dimensões do equipamento e a complexidade na interpretação prática dos resultados, este tipo de ensaios fica em geral limitado às aplicações em laboratório, sendo por isso mais utilizado para o desenvolvimento de novas composições e ensaio de novos materiais. Na Figura 2.9 apresenta-se um dos equipamentos mais utilizados nos estudos de BAC, o reómetro BML. Trata-se de um reómetro de cilindros coaxiais baseado no princípio da tensão de corte constante, onde é aplicada uma velocidade de rotação no cilindro exterior enquanto se mede o momento torsor no cilindro interior.



Figura 2.9– Reómetro de cilindros coaxiais da BML

Diversos estudos realizados com BAC mostram que os seus parâmetros reológicos diferem dos medidos no betão convencional, tal com a tensão de cedência (τ_0) que é mais baixa e a viscosidade plástica (η_{pl}) é mais alta. No entanto, segundo *Gomes* (Gomes, 2002) os valores da τ_0 e da η_{pl} dependem bastante do equipamento utilizado sendo necessário atender à alteração que este tipo de ensaios pode provocar no fluxo e, consequentemente, nas propriedades do BAC. Por outro lado, o aparelho de medição pode facilmente ser afectado pelo peso do BAC e pelo próprio desgaste mecânico, tornando-se por isso

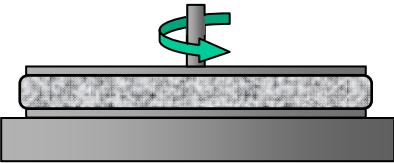
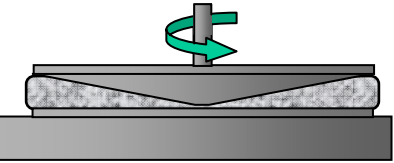
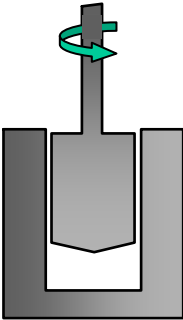
complicado encontrar relações entre os resultados de diferentes modelos estabelecidos a partir de reómetros do betão (Nunes, 2001).

Independentemente do tipo de equipamento utilizado existem algumas dificuldades importantes que se colocam quando se realizam ensaios reológicos no betão. Por um lado, a grande extensão granulométrica das partículas, desde o micrómetro ao centímetro, não permite que os betões sejam considerados suspensões homogêneas, e por outro lado, o número de factores que influencia o escoamento do betão é muito superior aquele que influencia a reologia das pastas. Por estas razões diversas metodologias para a concepção de uma composição de betão auto-compactável incluem testes em pastas. A realização de ensaios reológicos em pastas é muito mais conveniente em termos de quantidades de material necessário para os ensaios, as quantidades são menores, permitindo avaliar um grande número de variáveis em pouco tempo. Para além disso, o facto do BAC apresentar uma quantidade de pasta muito superior à do betão convencional, faz com que as propriedades da pasta e do betão tenham um comportamento muito mais próximo do que em betão convencional (Ferraris, 1999b).

Projectar composições de BAC requer, por um lado, que se optimize a curva granulométrica dos agregados e por outro lado, que a reologia da pasta tenha as características adequadas. As pastas são o meio ligante de um betão, ou seja, o meio fluido em que se encontram suspensos os agregados. De acordo com os estudos mais recentes, (Martys e Ferraris, 2002) e (Ferraris, 1999b), as pastas de cimento têm um carácter determinante nas propriedades reológicas do betão fresco. O valor crítico da tensão de cedência e da viscosidade da pasta vai depender das propriedades dos agregados (densidade, dimensão das partículas, distribuição e morfologia) e da máxima taxa de deformação esperada durante a colocação (Saak, Jennings *et al.*, 1999).

Usualmente para a caracterização da reologia de pastas de cimento são usados reómetros rotacionais com as geometrias do prato/prato, prato/cone ou dos cilindros concêntricos (Wallevik, 2003b). No Quadro 2.4 são apresentadas estas três geometrias bem como as suas principais vantagens e limitações.

Quadro 2.4 - Diferentes geometrias dos reômetros de pastas, suas vantagens e desvantagens (Soares, 2005)

Geometrias	Vantagens	Desvantagens
<u>Prato – Prato</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite variar a distância entre pratos (gap); • Facilidade em ajustar o gap; • Ideal para altas taxas de deformação; • Limpeza fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • A taxa de deformação varia ao longo da amostra (de zero no centro para o máximo na extremidade); • No caso de se utilizar solventes estes podem evaporar.
<u>Prato – Cone</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade em ajustar o gap (distância mínima entre o prato e o cone); • As taxas de deformação aplicadas são constantes em toda a geometria; • Limpeza fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • No caso de se utilizar solventes estes podem evaporar; • O gap a utilizar é fixo e deve ser baixo, não permitindo medir amostras com partículas de grandes dimensões.
<u>Cilindros Concêntricos</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite um gap (distância entre os cilindros interno e externo) elevado (1.0mm a 1.5mm); • Como existe uma maior área de contacto com a amostra, é mais sensível em amostras de mais baixa viscosidade; • Baixa evaporação dos solventes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria com maior inércia (pouco apropriado para testes de oscilação em materiais de baixa viscosidade); • Incompatível com sistemas de termoestatização planos, sistemas que permitem manter toda a amostra à mesma temperatura; • Limpeza difícil.

No decorrer deste trabalho foram realizados alguns estudos reológicos em pastas utilizando um reômetro rotacional com a geometria do prato/cone (Figura 2.10), por se tratar da única geometria que permite submeter toda a amostra à mesma taxa de deformação.



Figura 2.10 – Reômetro rotacional utilizado para ensaios reológicos em pastas de cimento

Apesar dos ensaios reológicos em pastas se apresentarem mais atractivos, parece não existir uma relação linear entre os parâmetros reológicos da pasta e do betão, na verdade trata-se de uma relação complexa que ainda não foi completamente estabelecida. Sabe-se que variações na pasta afectam a reologia do betão, mas a principal razão para que esta correlação ainda não se tenha estabelecido prende-se com o facto das condições de medição dos parâmetros reológicos das pastas não serem aquelas que na realidade a pasta de cimento se encontra no betão. Dependendo do conteúdo em pasta no betão, a distância entre agregados, pode variar consideravelmente. *Ferraris et al.* (1992) mostrou que a pasta tem um comportamento diferente dependendo do *gap* entre pratos do reómetro, parâmetro que pretende simular a distância entre agregados. Para se poder realizar uma correcta correlação entre estes dois tipos de ensaios a forma da mistura deve reproduzir a história de tensões do betão, a distância (*gap*) entre pratos do reómetro deve estar relacionado com o conteúdo em pasta no betão e a taxa de deformação utilizada deve ser semelhante à que vai ser aplicada durante a colocação do betão.

No caso do estudo reológico de pastas existe um problema adicional que se prende com o deslizamento da pasta nas paredes do reómetro, resultando numa diminuição drástica do valor da tensão de cedência. O deslizamento da pasta provocado pela formação de uma fina película de água pode ser minimizado usando uma geometria com uma superfície ligeiramente rugosa (Banfill, 2003).

2.2.2.2 Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento (*Slump flow test*) tem por objectivo avaliar a capacidade de deformação do betão quando sujeito somente ao seu peso próprio e sem qualquer restrição. Este ensaio permite ainda avaliar qualitativamente, por observação visual, a presença de segregação. Atendendo à simplicidade do equipamento utilizado e à facilidade do procedimento de ensaio, é um dos ensaios mais utilizados para avaliar as propriedades do BAC, tanto em laboratório como em obra.

Para este ensaio, que se baseia no ensaio de abaixamento preconizado nas normas EN 12350-2 (2002), é necessário dispor fundamentalmente de um cone de *Abrams* e de uma placa de aço com uma área superior a $0.9 \times 0.9 \text{ m}^2$ e com uma circunferência de 500mm de diâmetro desenhada, centrada na placa (Figura 2.11a). As principais medidas retiradas deste ensaio são o tempo que o betão demora a alcançar o diâmetro de 500mm (T50), medido desde o início do levantamento do cone, e o diâmetro final de espalhamento (Desp) (Figura 2.11b). O aspecto final do betão deve ser examinado para determinar a presença de sinais de segregação ou exsudação, que se manifesta pela presença de uma

auréola de pasta ou argamassa em volta do perímetro de espalhamento, presença de agregados acumulados no centro e/ou irregularidade na sua distribuição. Todo o equipamento utilizado durante o ensaio e seu procedimento são apresentados no Anexo D.



Figura 2.11 – a) Equipamento para o ensaio de espalhamento; b) Medição do diâmetro de espalhamento, $Desp$

O valor do diâmetro de espalhamento, $Desp$, é útil para avaliar a capacidade de deformação do BAC e pode correlacionar-se com a tensão de cedência caso o betão seja considerado um fluido de *Bingham*. Se adicionalmente ao valor do T_{50} se determinar o valor de T_{final} , tempo que decorre desde o início do levantamento do cone até que o betão deixe de se deformar, é possível obter uma medida da viscosidade. Em geral, uma maior diferença de tempo entre T_{final} e T_{50} significa maior viscosidade e coesão do betão. O valor do T_{50} por si só, não representa uma medida de viscosidade, mas pode constituir uma avaliação relativa da viscosidade de composições de BAC que apresentem o mesmo diâmetro final de espalhamento. Utilizando os valores de $Desp$ e T_{50} , *Sedran y Larrard* (1999), propuseram as seguintes relações com a viscosidade plástica (η_{pl}) e tensão de cedência (τ_0), equações (2.2) e (2.3), segundo a hipótese de um modelo de *Bingham* para o betão:

$$\eta_{pl} = \frac{\rho}{10000} (0.026.Desp - 2.39).T_{50} \quad (2.2)$$

$$\tau_0 = \frac{\rho}{11740} (808 - Desp) \quad (2.3)$$

onde η_{pl} é a viscosidade plástica (em Pa.s), ρ é a massa volúmica (em kg/m³), D_{50} é o diâmetro final de espalhamento (em mm), T_{50} é o tempo que o betão demora a alcançar o diâmetro de 500mm (em segundos) e τ_0 é a tensão de cedência (em Pa).

Apesar da facilidade de execução, este ensaio apresenta como grande limitação o facto de não permitir avaliar a capacidade do betão passar através de espaços entre armaduras, pelo que deve ser utilizado conjuntamente com outros ensaios. Por outro lado a avaliação da resistência à segregação é realizada através de uma simples observação visual, o que não é adequado para uma estimativa quantitativa e fiável do fenómeno.

2.2.2.3 Ensaio de fluidez

O ensaio de fluidez ou ensaio do funil (*V-funnel*) tem como objectivo avaliar a capacidade do betão passar por um espaço estreito, na direcção vertical, e apenas sob acção do seu peso próprio, qualificando a tendência para a segregação e para o bloqueio mediante a observação da variação da velocidade de fluxo.

Para este ensaio é utilizado um funil, normalmente em aço, com uma forma em V e uma abertura no fundo. A geometria da secção transversal pode ser circular ou rectangular, sendo a segunda a mais utilizada por se assemelhar à geometria das cofragens (Figura 2.12a).



a)



b)

Figura 2.12 – a) Equipamento para o ensaio de fluidez; b) Medição do tempo de escoamento, T_{funil}

A principal medida obtida com este ensaio é o tempo de fluxo (T_{funil}), tempo que decorre entre a abertura do orifício de descarga e o aparecimento do primeiro raio de luz no fundo do funil, (Figura 2.12b). Durante o ensaio pode também ser observado o fluxo do betão, de forma a ter uma ideia do bloqueio produzido. Todo o equipamento utilizado durante o ensaio e seu procedimento são apresentados no Anexo D.

O significado físico dos resultados está relacionado com vários aspectos do betão auto-compactável fresco. Quando a quantidade e dimensão dos agregados grossos são relativamente pequenos em relação à abertura do funil, a colisão e interacção entre as partículas não afecta as características de fluxo do betão fresco. Mediante estas condições, o T_{funil} permite avaliar a viscosidade da composição, mas sob condição de um diâmetro de espalhamento constante, tal como sucedia com o valor de T_{50} no ensaio de espalhamento. No caso da quantidade e dimensão dos agregados grossos ser relativamente grande para o tamanho da abertura do funil, a interacção inter-partículas é dominante nas características de fluxo do betão fresco. Atendendo a estas condições, o T_{funil} para além de permitir determinar, de forma relativa, a viscosidade, é útil para avaliar a capacidade do betão passar por espaços estreitos (Gettu e Agulló, 2003).

As grandes limitações deste ensaio reflectem-se essencialmente na forma pouco rigorosa com que se quantifica a tendência para a segregação e para o bloqueio e no facto de não permitir avaliar a capacidade de deformação. Para além disso, a deformação do betão (Desp) e a forma, granulometria e quantidade de agregado grosso, são factores importantes que influenciam o resultado do ensaio de fluidez. Atendendo a estes aspectos, o tempo de fluxo obtido através deste ensaio não é suficiente, por si só, para quantificar as propriedades necessárias que garantam a auto-compactabilidade do betão.

2.2.2.4 Ensaio da caixa-U

Este ensaio foi projectado para avaliar a capacidade do betão passar por espaços estreitos e a facilidade de enchimento, apenas sob acção do peso próprio. O ensaio da caixa-U (*U-Box*) reflecte a deformabilidade do betão fresco e a capacidade que este tem para fluir sem bloquear.

A caixa-U trata-se de um recipiente dividido em duas zonas separadas por um conjunto de varões paralelos, dispostos verticalmente, com um espaçamento reduzido entre eles (Figura 2.13a). Basicamente este ensaio consiste em encher o compartimento mais alto, mantendo a comporta na posição fechada que desliza entre as duas zonas em causa.

Depois de completamente cheio é aberta a comporta, e o betão flui por entre os varões para o segundo compartimento. A auto-compactabilidade é avaliada à custa da altura alcançada pelo betão no segundo compartimento depois de passar através dos varões, H (Figura 2.13b). Durante o ensaio pode ainda ser medido o tempo de fluxo do betão, dando uma ideia da viscosidade da composição, e avaliar qualitativamente a segregação, por observação visual. Todo o equipamento utilizado durante o ensaio e seu procedimento são apresentados no Anexo D.

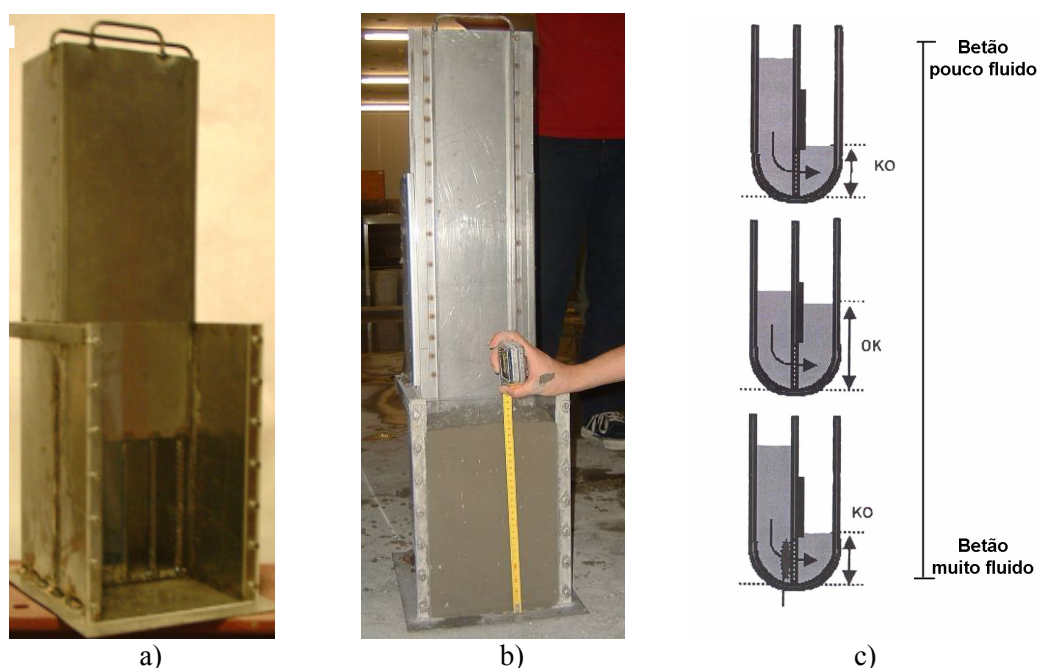


Figura 2.13 – a) Equipamento para o ensaio da caixa-U; b) Medição da altura de enchimento, H ; c) Avaliação da auto-compactabilidade com o ensaio da caixa-U

Contudo, quando se avalia um betão através do resultado deste ensaio deve-se ter em conta que o significado físico da altura de enchimento vem influenciado pelas proporções da composição (Gettu e Agulló, 2003). Por exemplo, quando a quantidade e dimensão dos agregados são pequenos quando comparado com o espaçamento entre armaduras, a altura de enchimento depende muito da capacidade de deformação do betão e da resistência à segregação. Neste caso o tempo de fluxo na caixa-U representa bem a viscosidade da composição. Por outro lado, quando a dimensão e quantidade dos agregados grossos são grandes em relação ao espaçamento entre armaduras, a colisão e interacção inter-partículas afecta a capacidade para passar em espaços estreitos e a velocidade de fluxo tende a ser lenta, principalmente se a viscosidade da composição não for muito alta. Neste caso, um

betão com tendência para a segregação apresentará uma pequena altura de enchimento mesmo exibindo grande fluidez (Figura 2.13c).

Este ensaio é sobretudo indicado para avaliar a segregação entre os agregados grossos e finos e a capacidade do betão para passar em espaços estreitos, mas não avalia bem a deformabilidade sem restrição, necessitando por isso de ser complementado com outros ensaios.

2.2.2.5 Ensaio da caixa-L

Com este ensaio pretende-se avaliar a capacidade do betão passar entre barras que simulam as armaduras, permitindo determinar valores que quantificam o bloqueio e a fluidez do betão depois de passar pelos obstáculos. Com o ensaio da caixa-L (*L-Box*) é ainda possível avaliar de forma qualitativa a resistência à segregação mediante observação visual.

Para este ensaio é utilizado uma caixa em forma de L, cuja parte vertical do L comunica com a parte horizontal através de um conjunto de varões com um espaçamento reduzido. Inicialmente a parte vertical da caixa é cheia com betão e posteriormente a comporta é aberta e o betão flui da parte vertical para a parte horizontal passando através dos varões de aço (Figura 2.14a). Durante o ensaio determina-se o tempo que o betão demora a percorrer uma distância longitudinal de 20 cm (T_{20}) e de 40 cm (T_{40}), e as alturas H_1 e H_2 que se alcançam em ambos os extremos da parte horizontal da caixa, com o betão já em repouso (Figura 2.14b). Todo o equipamento utilizado durante o ensaio e seu procedimento são apresentados no Anexo D.

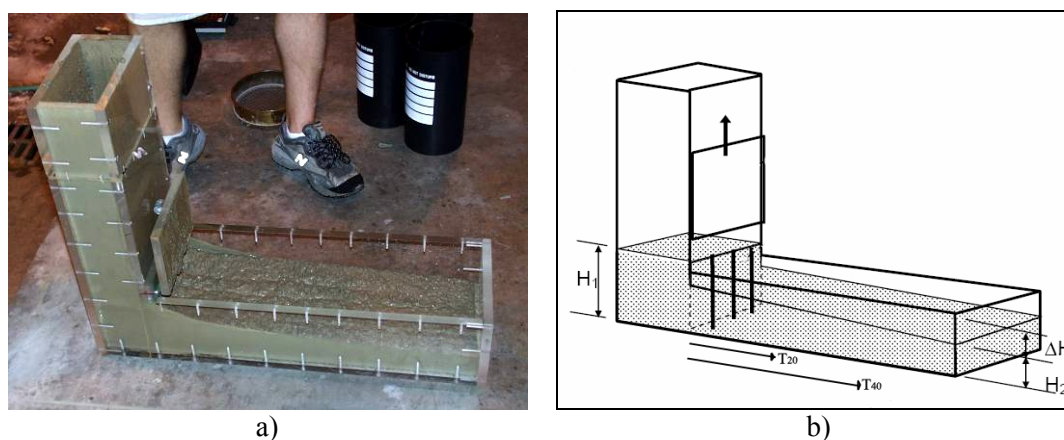


Figura 2.14 – a) Equipamento para o ensaio da caixa-L; b) Esquema das medições que são realizadas durante o ensaio da caixa-L

Os tempos medidos na caixa-L (T_{20} e T_{40}) permitem quantificar a velocidade de fluxo, no entanto, quando ocorrem fenómenos de bloqueio estes tempos não são representativos da fluidez do betão nem se podem correlacionar com os tempos do ensaio de espalhamento. A razão entre as alturas H_1 e H_2 (H_2/H_1) define o coeficiente de bloqueio. Este coeficiente constitui um bom indicador da capacidade do betão passar por espaços estreitos, o que inclui capacidade de deformação e resistência ao bloqueio. O ensaio permite ainda avaliar a resistência ao bloqueio e a estabilidade da amostra de betão, por observação visual. Nos casos em que se forma uma barreira de agregados atrás da armadura, considera-se que ocorre bloqueio dos agregados ou ocorreu segregação. Habitualmente, o bloqueio distingue-se pelas partículas do agregado presas entre os varões. Quando se observam partículas do agregado grosso distribuídas pela superfície de betão ao longo de toda a extensão da parte horizontal, o betão é considerado estável, ou seja, resistente à segregação (Gettu e Agulló, 2003).

A utilidade deste ensaio limita-se praticamente ao estudo do bloqueio e segregação, uma vez que os tempos T_{20} e T_{40} não são representativos da fluidez do betão e o fluxo na parte horizontal é influenciado pelo “efeito parede” (Bartos e Grauers, 1999) com consequências nos valores medidos dependentes das características da mistura (agregados grossos, coesão da pasta).

2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO BETÃO

A maioria dos constituintes do betão auto-compactável são os mesmos que os utilizados na fabricação do betão convencional. Assim, por exemplo, o cimento e os agregados (à excepção da dimensão máxima) não têm que cumprir requisitos específicos adicionais aos que são exigidos para o betão convencional de boa qualidade. Neste sentido, é sempre vantajoso do ponto de vista económico utilizar materiais locais, por forma a minimizar os custos de transporte.

O único constituinte atípico do BAC em relação ao betão convencional é o agente modificador de viscosidade que se emprega para conseguir um nível adequado de coesão na composição, e evitar a segregação e a exsudação durante a colocação do betão. Contudo, para que seja garantido uma viscosidade adequada, na generalidade dos casos, opta-se pela utilização de um elevado conteúdo em finos e só em casos excepcionais se utiliza agentes de viscosidade. Os materiais finos, devido à sua elevada superfície

específica promovem uma grande adsorção de água conferindo ao BAC no estado fresco elevada estabilidade. Este maior consumo de finos no BAC é acompanhado pela redução do conteúdo em agregado, especialmente do agregado grosso.

Com vista a obter as características reológicas desejadas, é ainda fundamental a utilização de superplastificante. O superplastificante permitirá garantir maior deformabilidade pela redução da tensão de cedência mas sem que a viscosidade seja muito afectada, importante para garantir uma boa resistência à segregação.

A Figura 2.15 apresenta uma relação dos volumes de materiais empregues geralmente em composições de betão auto-compactável (BAC) e em composições de betão convencional (BC). De salientar que a parcela da água, representada na figura a cor azul clara, corresponde na realidade ao volume de água e superplastificante.

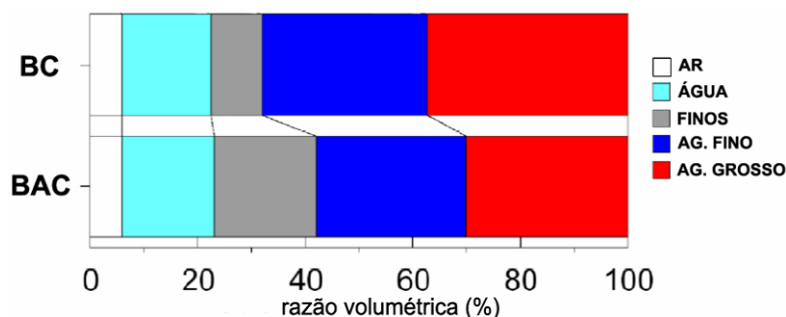


Figura 2.15 – Razão volumétrica dos constituintes utilizados nas composições de betão auto-compactável (BAC) e nas composições de betão convencional (BC) (Okamura e Ouchi, 2003)

Nos pontos seguintes são apresentados de forma individualizada os materiais a considerar na fabricação de um BAC, salientando-se as suas características mais relevantes com vista a um comportamento adequado do betão no estado fresco e endurecido. No caso do BAC as características químicas e físicas dos materiais constituintes assumem particular importância para o comportamento do betão no estado fresco, uma vez que podem colocar em causa a auto-compactabilidade do betão.

2.3.1 Materiais finos

As especificações da EFNARC (EFNARC, 2002) classificam como finos as partículas sólidas com dimensões inferiores a 0.125mm, os quais podem ser constituídos por cimento e adições. A selecção dos materiais finos é de extrema importância para o BAC dado que as suas propriedades afectam não só o grau de auto-compactabilidade do betão como também a qualidade do betão endurecido. Atendendo ao facto de uma

composição de BAC requerer grande quantidade de finos, uma combinação de cimento e adições torna-se vantajosa quer ao nível técnico, dado o elevado calor de hidratação gerado por grandes conteúdos em cimento, quer ao nível económico, dado que o cimento constitui uma parcela importante no custo da composição final.

2.3.1.1 Cimento

Uma das principais propriedades do BAC no estado fresco é a elevada deformabilidade, afectada fundamentalmente pela dispersão das partículas de cimento devido ao efeito do adjuvante, mas também pelas características dos finos (Nawa, Izumi *et al.*, 1998). Das principais características do cimento que afectam a reologia do betão destacam-se entre as propriedades físicas, a distribuição granulométrica e a forma das partículas e entre as propriedades químicas, a influência dos componentes minerais do cimento na adsorção do adjuvante.

Em termos de influência da distribuição granulométrica e forma das partículas verificou-se que quanto maior o empacotamento das partículas maior a fluidez da pasta, ou seja, menor o valor da tensão de cedência. Por outro lado quanto maior a superfície específica do cimento, maior será a viscosidade plástica. Num cimento com maior superfície específica, o número de partículas de finos na pasta aumenta, e assim aumenta a área em contacto com a água. Desta forma, a distância entre partículas diminui e a frequência de colisão e os pontos de contacto entre as partículas aumenta (Nawa, Izumi *et al.*, 1998).

As propriedades químicas do cimento afectam fundamentalmente a forma como o adjuvante é adsorvido pelos componentes minerais do cimento, influenciando o grau de dispersão das partículas. A adsorção das moléculas de adjuvante pelo cimento ocorre inicialmente à superfície dos componentes do cimento que hidratam mais rapidamente, o aluminato tricálcico (C_3A) e do aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). O restante adjuvante é adsorvido pelo silicato tricálcico (C_3S) e pelo silicato bicálcico (C_2S), que são os principais componentes do cimento. Dada a forma como ocorre a adsorção das moléculas de superplastificante por parte dos componentes minerais do cimento, recomenda-se a utilização de cimentos com uma quantidade moderada de aluminatos (C_3A e C_4AF) para que a adsorção seja mais uniforme em toda a superfície do cimento e a acção dispersante do adjuvante seja exercida plenamente (Nawa, Izumi *et al.*, 1998). A EFNARC (2002) recomenda que o teor de C_3A no cimento seja inferior a 10% em massa por forma a garantir uma maior eficácia do adjuvante na acção dispersante. Além disso, os sulfatos existentes no cimento, geralmente colocados sobre a forma de gesso para retardar a presa,

podem constituir um problema para a acção do superplastificante. A etringite, produto de hidratação do C_3A e C_4AF com gesso, cobre as partículas de cimento não hidratadas impedindo estas adsorvam o superplastificante. Adicionalmente, num betão onde o conteúdo em cimento é elevado levanta-se o problema do elevado calor de hidratação. No caso particular do BAC a utilização de um cimento com menor quantidade de C_3A e C_4AF (de calor de hidratação moderado) ou de um cimento rico em belite (C_2S) permite aproveitar a acção de dispersão de uma forma mais eficaz e inibe o desenvolvimento do calor de hidratação (Nawa, Izumi *et al.*, 1998).

2.3.1.2 Adições

As adições são materiais inorgânicos finamente moídos que podem ser adicionados ao betão (na amassadura) com a finalidade de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais. Segundo a NP EN 206-1 (2005) as adições são divididas em duas categorias (tipo I e tipo II) em função das suas propriedades pozolânicas. As adições tipo I são designadas como quase inertes (fíler calcário) e as tipo II como pozolanas ou adições hidráulicas (sílica de fumo ou cinzas volantes).

No BAC são utilizadas diferentes tipos de adições com o objectivo principal de dotar a composição da apropriada coesão, necessária para evitar a segregação dos agregados grossos e a exsudação da água durante a colocação do betão. As adições mais utilizadas no caso do BAC são o fíler calcário, as cinzas volantes e a sílica de fumo. Este tipo de finos pode actuar de duas formas distintas: aumentando a capacidade de reter água da mistura devido à sua elevada superfície específica ou aumentando a tixotropia da mistura. O emprego de adições permite ainda reduzir o conteúdo de cimento na pasta, evitando os problemas relacionados com o excesso de calor de hidratação e retracção. (Gettu e Agulló, 2003).

Para além dos benefícios ao nível das propriedades reológicas do betão, a utilização de adições minerais potencia benefícios a nível das propriedades do betão endurecido, a nível económico e a nível ambiental. A nível do betão endurecido são obtidas melhorias quer nas propriedades mecânicas (por exemplo a resistência à compressão) quer nos parâmetros de durabilidade (por exemplo a permeabilidade). Em termos económicos uma substituição do cimento por uma adição contribui em princípio, para reduzir a diferença de custo relativamente ao betão convencional. No que diz respeito aos benefícios ambientais, esta substituição permite por um lado, reduzir a produção de clínquer e com isso o lançamento de CO_2 na atmosfera e por outro lado, promover a utilização de resíduos industriais como adições.

A) Sílica de fumo

A sílica de fumo é um subproduto da fabricação do silício metálico ou das ligas de silício, especialmente ferro-silício. Constituída fundamentalmente por SiO_2 (85 a 90%), caracteriza-se por uma estrutura amorfa, assemelhando-se à forma esférica. O diâmetro das partículas varia entre $0.01\mu\text{m}$ até $0.5\mu\text{m}$, com um valor médio próximo de $0.1\mu\text{m}$, ou seja, cerca de 100 vezes inferior ao cimento. A superfície específica, medida por adsorção de nitrogénio, é elevada variando entre 15000 a $25000\text{m}^2/\text{kg}$ (Coutinho e Gonçalves, 1994).

A sílica de fumo promove melhorias nas propriedades do betão fresco, nomeadamente, o aumento da coesão, garantindo misturas mais estáveis, e a drástica redução da exsudação, devido ao tamanho reduzido das partículas. Contudo, quando se utiliza sílica de fumo a necessidade de superplastificante cresce significativamente. Em primeiro lugar, uma composição que inclui sílica de fumo é potencialmente menos deformável que uma composição sem sílica de fumo, quando se mantém constante a relação água/finos. Em segundo lugar, o uso da sílica de fumo reduz significativamente a relação água/finos para se obter uma determinada viscosidade, mas uma redução desta relação diminui a deformabilidade da mistura caso a dosagem de superplastificante seja mantida constante. Em terceiro lugar, a adsorção do superplastificante à superfície das partículas da sílica de fumo é bastante intensa devido à sua elevada reactividade inicial e finura. Estes fenómenos muito provavelmente actuam conjuntamente aumentando a dosagem de superplastificante necessária para obter uma mistura com elevada deformabilidade e viscosidade adequada (Takada, Pelova *et al.*, 1999).

Ao nível do betão endurecido a utilização desta adição, aumenta a resistência à compressão dada a maior densidade da pasta e reduz a permeabilidade, garantindo maior durabilidade às estruturas (Níelsson e Wallevik, 2003).

A disponibilidade da sílica de fumo é no entanto bastante limitada, sendo em geral, utilizada em aplicações especiais, como por exemplo, em estruturas expostas a ambientes marítimos ou de agressividade química elevada. Na produção de BAC os teores usuais de emprego da sílica em substituição do cimento, são de 5 a 8%.

B) Cinzas volantes

As cinzas volantes são um subproduto industrial obtido a partir da queima de carvão pulverizado ou moído, em centrais termoeléctricas. Durante a queima do carvão resultam resíduos que são arrastados com os gases da combustão e recolhidos através de captação mecânica ou por precipitação electrostática. Segundo a norma NP EN 450-1

(2006), define-se cinzas volantes como um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas oriundas da queima do carvão pulverizado, com propriedades pozolânicas e constituídas essencialmente, por SiO_2 e Al_2O_3 , contendo no mínimo 25% em massa de SiO_2 reactivo.

Em função da sua proveniência e até mesmo entre diferentes remessas da mesma central termoelétrica, a qualidade das cinzas pode variar consideravelmente, alterando de forma significativa as propriedades no estado fresco e endurecido do BAC. As diferenças nas propriedades físicas e químicas das cinzas pode dever-se às diferentes origens do carvão utilizado na queima, aos diferentes procedimentos empregues na combustão, à presença de fuel-óleo nas câmaras de combustão ou ao modo como as cinzas são recolhidas e armazenadas (Estevéz e Gutiérrez, 1990). Assim, por exemplo, a ocorrência de partículas de grandes dimensões (superior a $125\mu\text{m}$) está associada a grandes quantidades de carbono. Trata-se de material inqueimado extremamente poroso, responsável pelo elevado valor da superfície específica verificado na maioria das cinzas volantes. Como consequência, elevados teores de carbono implicam maior necessidade de água em betões contendo cinzas volantes. Nas figuras seguintes apresentam-se fotografias tiradas em microscópio electrónico com duas ampliações distintas de dois lotes de cinzas volantes de origens diferentes. A Figura 2.16 mostra um lote de cinzas com um baixo teor em inqueimados, enquanto que a Figura 2.17 mostra um lote de cinzas com um elevado teor em inqueimados onde é possível observar uma das partículas porosas contendo outras partículas de cinzas de pequenas dimensões e forma esférica.

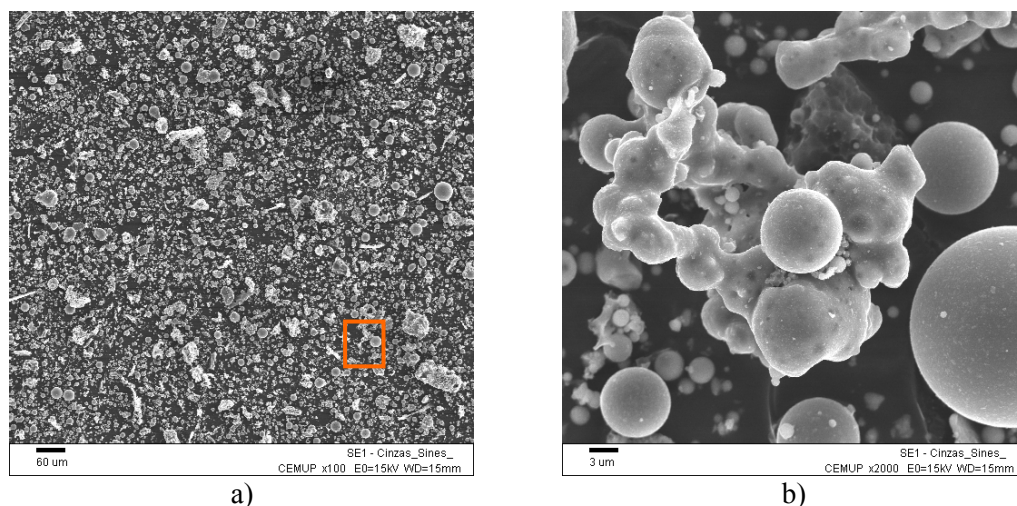


Figura 2.16 – Fotografias ao microscópio electrónico de cinzas volantes de origem A: a) com ampliação de $100\times$; b) com ampliação de $2000\times$

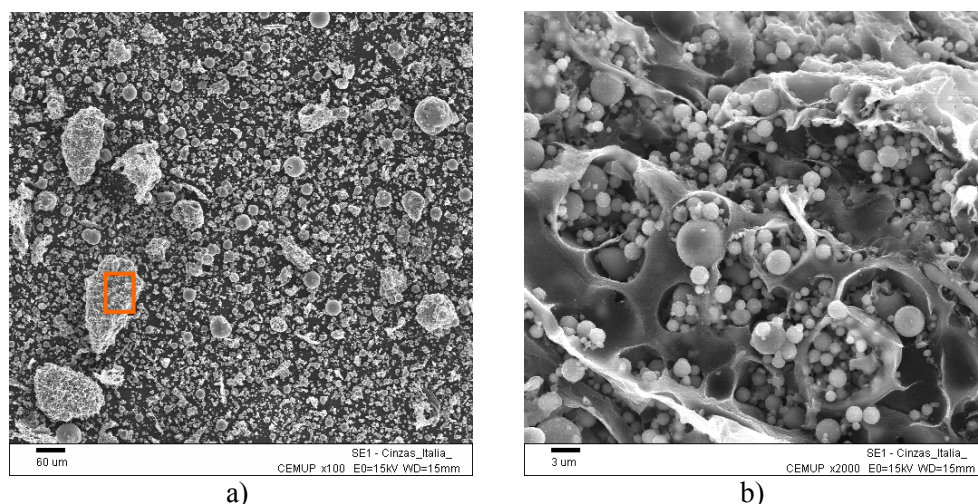


Figura 2.17 – Fotografias ao microscópio electrónico de cinzas volantes de origem B: a) com ampliação de 100×; b) com ampliação de 2000×

A forma aproximadamente esférica das partículas, embora de reduzidas dimensões, e a sua superfície pouco rugosa, influencia as propriedades reológicas do betão, conferindo-lhe maior deformabilidade ou reduzindo a necessidade de água. O facto de serem partículas de pequenas dimensões, ligeiramente mais pequenas que as de cimento mas bastante mais finas que os restantes componentes, promove misturas com maior compacidade.

Ao nível do estado endurecido do betão, a utilização de cinzas reflecte-se quer nas características mecânicas como de durabilidade, devido essencialmente a dois efeitos: físico (efeito filler) e químico (efeito pozolânico). Entre os principais efeitos da utilização de cinzas volantes no betão endurecido, destacam-se os seguintes (Azevedo, 2002):

- Reduz a resistência à compressão nas primeiras idades, embora a resistência final seja geralmente superior;
- Reduz a permeabilidade do betão;
- Minimiza a reacção álcalis-sílica;
- Aumenta a resistência à acção dos sulfatos;
- Aumenta a resistência à penetração de cloretos;
- Aumenta a resistência à carbonatação;
- Promove uma diminuição da corrosão das armaduras.

C) Fíler calcário

O fíler calcário é um material finamente moído, com uma finura sensivelmente idêntica à do cimento, proveniente da rocha calcária e cujo principal componente é a calcite (CaCO_3). Dependendo da sua composição química, o fíler calcário pode ser classificado como calcítico ou dolomítico. O calcário calcítico é composto basicamente por carbonato de cálcio (CaCO_3), enquanto que o calcário dolomítico é gerado a partir da substituição de parte do cálcio por magnésio, formando a dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). O alto teor em magnésio do fíler dolomítico constitui um problema para a sua utilização no betão, comprometendo a durabilidade em função do risco de ocorrerem reacções álcali-carbonato (EFNARC, 2002). São no entanto vários os factores que diferenciam os fileres e influenciam o seu desempenho no betão: a sua origem, a sua composição química e mineralógica, o seu grau de cristalização, a finura, a forma das partículas, as características da superfície, a dureza e a porosidade. Na Figura 2.18, apresentam-se fotografias tiradas em microscópio electrónico, em duas ampliações distintas, de fíler calcário.

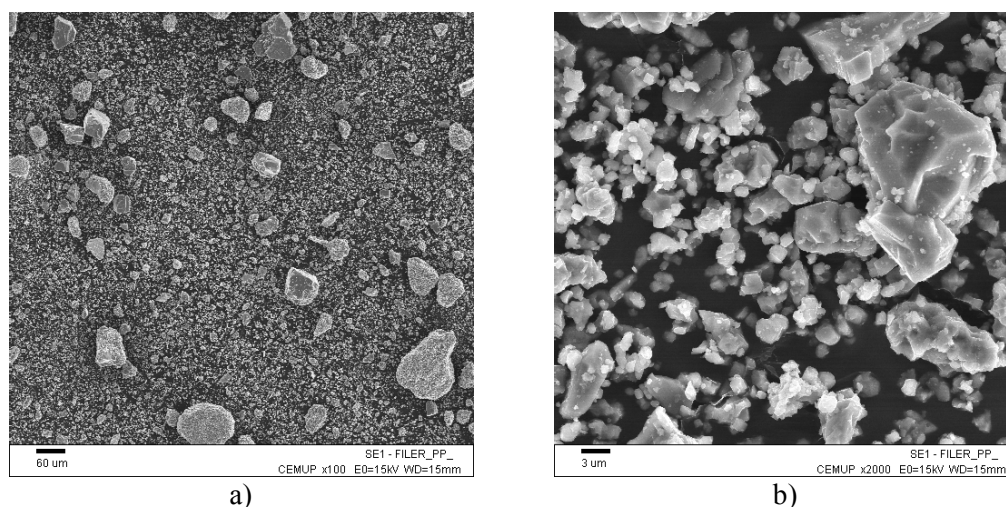


Figura 2.18– Fotografias ao microscópio electrónico de fíler calcário: a) com ampliação de $100\times$; b) com ampliação de $2000\times$

A acção do fíler calcário ocorre quer por efeito físico, quer por efeito químico, de forma que não constitui um material completamente inerte. A capacidade do fíler reagir com o cimento depende essencialmente do seu grau de cristalização e da sua finura. O efeito físico do fíler ocorre devido essencialmente à sua finura, permitindo por um lado, uma melhoria da distribuição granulométrica da composição de betão, o que conduz a uma melhoria da trabalhabilidade, e por outro lado, uma maior retenção de água eliminando a exsudação mas aumentando a viscosidade. *Esping* (2003) ao analisar diferentes tipos de

filer na produção de argamassas de BAC, verificou que, quanto maior a superfície específica, maior a necessidade de água para que se sejam cumpridos os requisitos exigidos de auto-compactabilidade. Assim sendo, mantendo constante o conteúdo de água das misturas, quanto mais fino for o filer maior a necessidade de superplastificante, para que sejam atingidas as mesmas características de deformabilidade. Ao nível do betão endurecido o facto do filer promover uma granulometria mais contínua aumenta a compacidade da mistura, o que melhora a durabilidade do betão.

2.3.2 Agregados

Os agregados usualmente empregues na fabricação dos betões convencionais servem para o betão auto-compactável (EFNARC, 2002). Como em todos os betões de boa qualidade, é preferível empregar agregados limpos e com uma granulometria contínua. Uma distribuição granulométrica dos agregados pouco contínua potencia um maior consumo de cimento, menor fluidez da mistura e aumento dos vazios entre os agregados, o que afecta as características mecânicas e de durabilidade do betão no estado endurecido (Chen, Tsai *et al.*, 2003). Além disso, as características dos próprios agregados, nomeadamente, forma e textura das partículas, exercem grande influência nas propriedades do betão no estado fresco. Agregados com uma elevada superfície específica e textura áspera necessitam de maiores quantidades de pasta e água para obter elevada fluidez enquanto que partículas arredondadas potenciam uma melhoria na fluidez e promovem uma redução na percentagem de vazios devido ao seu melhor empacotamento.

Um outro aspecto que pode influenciar drasticamente a reologia do betão prende-se com o volume total de agregados na composição e a proporção entre agregado fino e grosso. Para garantir um nível adequado de auto-compactabilidade no BAC, é necessário reduzir a quantidade de agregado grosso em função de um aumento do teor de partículas finas (Okamura e Ouchi, 2003).

A Figura 2.19 apresenta para diferentes betões, betão convencional (BC), betão auto-compactável (BAC) e betão compactado com cilindro (BCC), o grau de empacotamento dos agregados na argamassa ($\text{Volume de agregado fino} / \text{Volume total de sólidos na argamassa}$) e no betão ($\text{Volume de agregado grosso} / \text{Volume total de sólidos no betão}$). No caso do presente estudo o volume total de sólidos na argamassa corresponde à soma do volume real de agregado fino com volume real das adições, considerando como volume real o volume efectivamente ocupado pelas partículas, limitado pela sua superfície exterior. O volume total de sólidos no betão corresponde ao volume total de sólidos na argamassa adicionado do volume real de agregados grossos. No caso do BAC o grau de

empacotamento do agregado grosso deve ser cerca de 50% e do agregado fino cerca de 60%, inferior ao registado nos outros betões, o que evidencia a maior necessidade de pasta deste betão (Okamura e Ouchi, 2003).

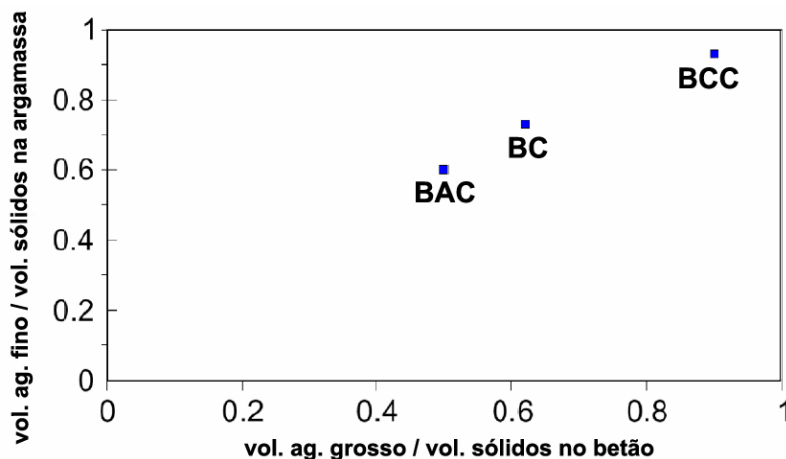


Figura 2.19 – Grau de empacotamento do agregado grosso no betão e agregado fino na argamassa para o BC, BAC e BCC (Okamura e Ouchi, 2003)

2.3.2.1 Agregado fino

As características físicas dos agregados finos (distribuição granulométrica e forma) assim como o seu conteúdo na composição afectam o comportamento do betão no estado fresco. Durante o movimento do betão no interior da cofragem a argamassa é submetida a tensões normais e a tensões de corte provocadas pela aproximação dos agregados grossos perante a presença de obstáculos (Figura 2.20). A tensão de corte resistente da argamassa, indicador da sua deformabilidade, é afectada pelas características físicas dos agregados finos, quanto maior for o seu conteúdo e mais angulosas forem as partículas, maior a resistência ao corte e menor a deformabilidade (ver Figura 2.21) (Okamura e Ouchi, 2003).

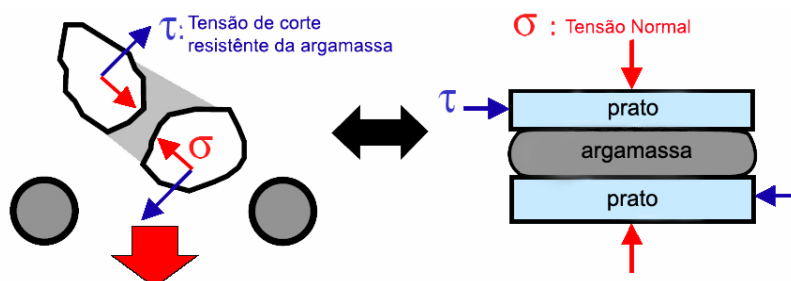


Figura 2.20 – Representação das tensões geradas na argamassa pela aproximação do agregado grosso devido à presença de obstáculos, na direita a mesma representação mas ao nível do reómetro (Okamura e Ouchi, 2003)

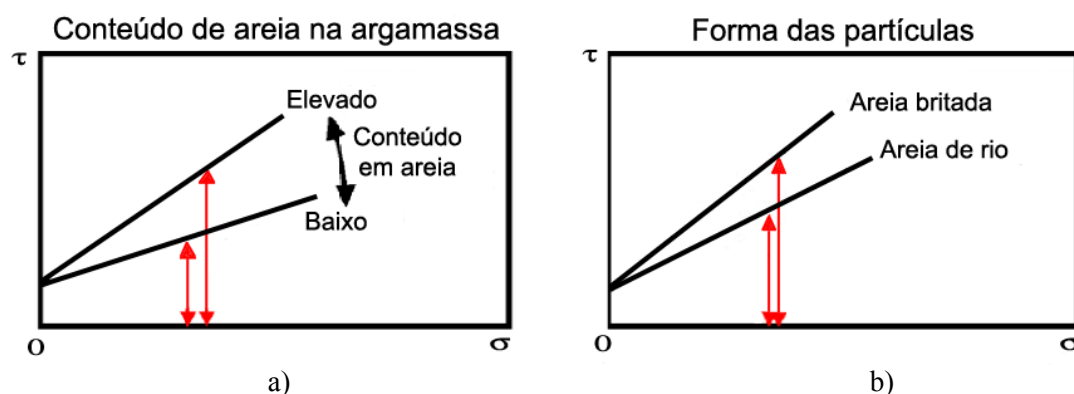


Figura 2.21 – Evolução da tensão resistente de corte com a tensão normal: a) diferentes conteúdos em areia na argamassa; b) diferentes formas das partículas (Okamura e Ouchi, 2003)

O volume de agregado fino não deve ser no entanto nem muito baixo nem muito alto, na realidade existe um volume óptimo de agregado fino por unidade de volume de argamassa (V_s/V_m) que depende do tipo de agregado fino e da forma das partículas, para um mesmo valor do módulo de finura. Se o V_s/V_m for demasiado baixo, o esqueleto granular pode ser insuficiente para a quantidade de pasta, conduzindo a segregação e/ou exsudação e se o V_s/V_m for muito elevado, a fluidez do betão diminuirá porque a quantidade de pasta entre as partículas de agregados é insuficiente (Fang, Jianxiong *et al.*, 1999).

2.3.2.2 Agregado grosso

As características dos agregados grossos, nomeadamente, a forma, natureza quantidade e máxima dimensão interferem nas propriedades de auto-compatibilidade do betão. Segundo a especificação da EFNARC (EFNARC, 2002) a dimensão máxima do agregado grosso para o BAC não deve ultrapassar os 20mm sendo usual variar entre 16mm e 20mm. A definição da dimensão máxima da agregado grosso deve ter em conta a distância mínima entre os obstáculos, por forma a evitar o bloqueio. Quanto maior a quantidade de agregado grosso e a dimensão máxima desse agregado, menos uniforme é o fluxo e menor é a capacidade do betão fluir através de obstáculos.

2.3.3 Adjuvantes

O adjuvante, segundo a norma NP EN 206-1 (2005), é um material adicionado durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido.

No caso do BAC, os adjuvantes representam materiais de extrema importância, podendo-se destacar os superplastificantes como sendo indispensáveis para garantir as principais características do estado fresco. A introdução destes adjuvantes na mistura permite melhorar o desempenho do betão à custa da redução da quantidade de água mantendo uma elevada fluidez.

Utilizam-se também, em alguns casos adjuvantes promotores de viscosidade, os quais garantem viscosidade e coesão adequadas à mistura, evitando-se a tendência para a segregação. Estes adjuvantes são constituídos basicamente de polímeros solúveis em água.

2.3.3.1 Superplastificante

No fabrico do BAC têm vindo a ser empregues diferentes tipos de superplastificantes baseados em naftalenos e melaminas modificadas e em copolímeros de nova geração (Skarendahl e Petersson, 2001). Contudo, os copolímeros em geral e os policarboxilatos em particular, parecem ser os mais adequados para o BAC. Devido à sua maior eficiência permitem uma maior redução de água, maiores resistências iniciais, e manutenção da fluidez por um tempo prolongado, em relação aos outros adjuvantes (Roncero, 2000). Em termos químicos, os policarboxilatos baseiam-se em copolímeros de ácido acrílico e grupos de éter de ácido acrílico que criam uma capa de adsorção de grande volume em redor das partículas de cimento devido às suas grandes cadeias laterais, impedindo a floculação e facilitando a alta fluidez da pasta de cimento.

As partículas de cimento quando entram em contacto com a água apresentam forte tendência para a floculação, resultado de diversos tipos de interacções, tais como forças de *Van der Waals* entre as partículas (forças electrostáticas entre regiões com cargas opostas, de forte ligação envolvendo moléculas de água ou compostos hidratados). Parte da água fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo a disponibilidade de água para a lubrificação da mistura. Estes fenómenos aumentam a viscosidade da mistura e reduzem a área específica dos grãos de cimento disponível para as reacções de hidratação. Para que a distribuição da água na mistura seja homogénea e para que a adsorção se dê na superfície de todos os grãos, as partículas de cimento devem estar desfloculadas e manter-se num alto grau de dispersão. Observa-se que a dispersão promovida pelos superplastificantes confere maior homogeneidade à mistura e distribui mais uniformemente os espaços entre grãos.

Roncero (2000) realizou uma intensa pesquisa sobre adjuvantes superplastificantes e propôs que as interacções entre as partículas de cimento e o adjuvante sejam de dois

tipos: interacções físicas e químicas. Entre as acções produzidas pelo superplastificante sobre as partículas de cimento, podem-se distinguir quatro tipos de efeitos (Petersson, Billberg *et al.*, 1995):

1) Efeito da composição química do superplastificante

Usualmente os superplastificantes utilizados no betão são constituídos por polímeros carregados negativamente e solúveis em água. Verificou-se que quanto maior a massa molecular do adjuvante melhor se efectuará a adsorção por parte das partículas de cimento.

2) Efeito de adsorção função do tipo de cimento

Quando as moléculas de polímeros carregadas negativamente entram em contacto com a superfície das partículas de cimento são adsorvidas, isto é, são fixadas à superfície. A formação desta camada superficial de polímeros, diferente da camada original, confere às partículas de cimento uma carga negativa importante para promover uma desfloculação do cimento (Figura 2.22). A forma de adsorção do superplastificante difere da composição química do cimento, sendo no caso do aluminato de cálcio (C_3A) muito rápida e forte, enquanto que no caso do silicato tricálcico (C_3S) é mais lenta e uniforme. Por outro lado o superplastificante só deve ser adicionado à mistura, após ter decorrido algum tempo de mistura do cimento com a água, para que a adsorção seja uniforme e eficaz.

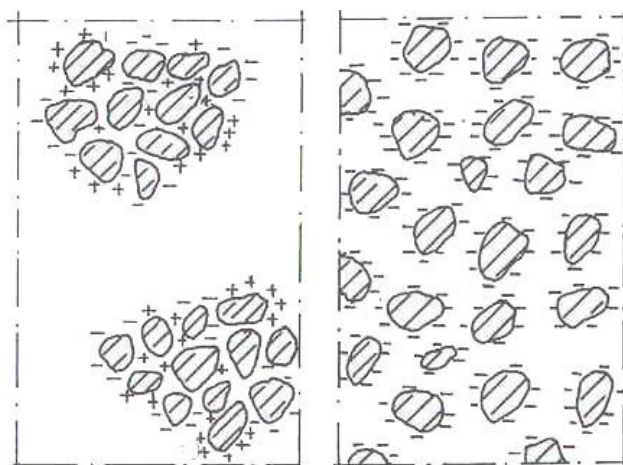


Figura 2.22 – Princípio do efeito de adsorção na dispersão das partículas de cimento (Petersson, Billberg *et al.*, 1995)

3) Efeito da estabilização electrostática

Num meio aquoso, superfícies carregadas similarmente repelem-se por um mecanismo electro-osmótico, usualmente chamado de estabilização electrostática. Esta adsorção dos polímeros de superplastificante na superfície das partículas de cimento confere-lhes uma elevada carga negativa, de tal forma que as partículas repelem-se umas às outras e a dispersão fica estabilizada (Figura 2.23a).

4) Efeito da estabilização estérica

Os produtos à base de policarboxilato, além de agirem por repulsão electrostática, a dispersão das partículas de cimento responsável pelo aumento de fluidez pode ser relacionada com um efeito conhecido como repulsão estérica. O efeito da estabilização estérica é produzido pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero. Esta arquitectura produz um forte efeito dispersante, uma vez que o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de adjuvante cria uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de cimento (Figura 2.23b).

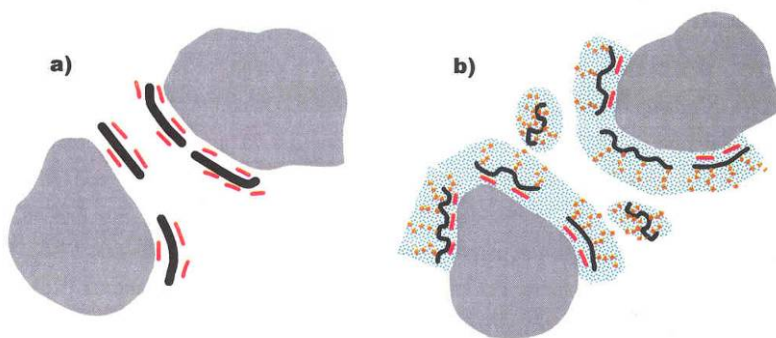


Figura 2.23 – a) Efeito da estabilização electrostática; b) Efeito da estabilização estérica
(Nunes, 2001)

Os aditivos superplastificantes actuam na mistura de várias formas, sempre contribuindo para minimizar o atrito entre as partículas que compõem o betão. Os superplastificantes podem ser utilizados com três diferentes objectivos:

- O superplastificante é adicionado ao betão sem qualquer alteração da composição da mistura, obtendo-se um betão fluido;
- O superplastificante é utilizado para reduzir por um lado, o conteúdo em água e por outro lado, o conteúdo em cimento, sendo uma forma de obter um betão mais económico;
- O superplastificante é utilizado fundamentalmente para reduzir o conteúdo em água, permitindo aumentar a durabilidade e a resistência à compressão.

No caso do BAC a utilização do superplastificante visa fundamentalmente obter um betão de elevada trabalhabilidade mas com redução do conteúdo em água. Em termos do betão endurecido, se a incorporação do superplastificante for utilizada para reduzir o conteúdo em água, a redução na razão água/cimento resulta num aumento da resistência. Mas para além de reduzir esta relação, o aumento da resistência pode dever-se a uma melhor dispersão das partículas de cimento, permitindo que as reacções de hidratação se dêem melhor e de uma forma mais homogénea. Relativamente à forma como a resistência à compressão se comporta ao longo do tempo, a presença do superplastificante nas primeiras idades retarda a evolução da resistência, enquanto que nas idades subsequentes esta evolução é acelerada. Como resultado da melhor trabalhabilidade do betão no estado fresco contendo superplastificante, o betão obtido é mais denso e com uma estrutura mais homogénea, o que na maioria dos casos, resulta em menor permeabilidade (Petersson, Billberg *et al.*, 1995).

Contudo a utilização dos superplastificantes pode provocar alguns efeitos indesejáveis, como por exemplo, incorporação de certa quantidade de ar ou retardamento exagerado da presa. Por estas razões e até por questões económicas será necessário realizar um estudo da sua contribuição efectiva no sentido de se obter betões duráveis e resistentes.

2.3.3.2 Agentes de viscosidade

Os agentes modificadores de viscosidade são adjuvantes químicos que melhoram substancialmente a coesão do betão e, por isso, tendem a limitar a perda de água por exsudação e minimizam a tendência para a segregação do betão. Do ponto de vista reológico, estes adjuvantes induzem no betão uma viscosidade moderada/alta conjuntamente com um comportamento pseudoplástico, isto é, a sua viscosidade diminui à medida que se aumenta a taxa de deformação. O seu emprego conjuntamente com superplastificantes de última geração possibilita a obtenção de betões estáveis apesar de

terem grande fluidez, permitindo maior facilidade nas operações de mistura, bombagem e colocação. O comportamento pseudoplástico conferido pelo agente de viscosidade facilita a utilização do BAC, uma vez que, o lançamento do betão nas cofragens ocorre sob elevadas taxas de deformação, a viscosidade diminui, facilitando a operação. Por outro lado, após a aplicação, a viscosidade aumenta e garante ao betão a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas (Khayat, Hu *et al.*, 1999).

O emprego de um agente de viscosidade não é contudo imprescindível para obter um betão auto-compactável, a sua utilização é indispensável unicamente no caso dos finos por si só não serem capazes de conferir suficiente coesão à mistura (AFGC, 2000). Contudo, se se tiver em conta que a sua utilização permite que o betão seja menos sensível a pequenas alterações do conteúdo em água, do módulo de finura da areia e da dosagem de superplastificante, o seu emprego pode contribuir para homogeneizar a qualidade destes betões e facilitar a sua produção (Okamura, Ozawa *et al.*, 2000).

Os mecanismos de acção dos agentes de viscosidade são essencialmente de dois tipos: os que actuam sobre as partículas dos finos, tais como as do cimento; e os que actuam sobre a água livre existente no betão. Dentro dos agentes de viscosidade destacam-se os éteres de celulose, que actuam sobre as partículas de cimento, e os bio-polímeros (por exemplo *welam gum*), que absorvem a água e incham confinando a água de forma semelhante aos materiais finos. Os éteres de celulose são constituídos por uma cadeia linear de moléculas de glucose, que foi tratada com uma base forte para que fosse solúvel em água, e que possui numerosas pontes de hidrogénio inter- e intra-moléculares que lhe conferem uma configuração helicoidal que se enrola de forma aleatória. Por outro lado a *welam gum* é um polissacarídeo natural, de alto peso molecular, produzido mediante uma fermentação aeróbica, que através de pontes de hidrogénio forma uma dupla hélice com uma configuração de barra rígida. O comportamento pseudoplástico depende da formação destas hélices e, neste sentido a *welam gum* apresenta um comportamento mais pseudoplástico (Gettu e Agulló, 2003). Uma outra vantagem da utilização de *welam gum* prende-se com o facto dos agentes de viscosidade que não são adsorvidos pelas partículas de cimento não competirem com o superplastificante pelos locais de adsorção na superfície das partículas e por esta razão, para este tipo de agentes de viscosidade, a fluidez mantém-se com o aumento da viscosidade.

Considerando o estado endurecido, o maior problema relaciona-se com a alteração na forma como evoluem as resistências à compressão ao longo do tempo (Petersson, 1999). Quando são utilizadas dosagens médias a altas de agentes de viscosidade ocorre uma diminuição da resistência em idades mais jovens, quando comparada com betões onde não

foi utilizado agente de viscosidade. Segundo alguns autores, esta diminuição na resistência deve-se fundamentalmente ao atraso na hidratação e à menor disponibilidade de água, uma vez que parte desta está retida pelo adjuvante. Para idades mais avançadas, a possível diminuição da resistência parece estar relacionada com o aumento de ar ocluso e o aumento da quantidade de poros capilares maiores em presença do agente de viscosidade (Gettu e Agulló, 2003). Por outro lado, a permeabilidade à entrada de cloretos, parece ser menor em betões onde foi utilizado agente de viscosidade. Este resultado, que contradiz a avaliação da porosidade em que se observa um ligeiro aumento da quantidade dos poros maiores ($> 50\text{nm}$), pode estar relacionado com a modificação da carga iónica da solução e das suas propriedades eléctricas em presença destes agentes, que para além disso diminuem a acumulação de água junto aos agregados minimizando a porosidade da interface (Khayat, 1996).

2.3.4 Água

A utilização de água no betão é imprescindível para que ocorra a hidratação do cimento. Por outro lado o seu emprego permite alterar a reologia do betão, uma vez que um aumento da quantidade de água livre traduz-se numa diminuição da tensão de cedência (maior deformabilidade) e numa diminuição da viscosidade da mistura. Ao contrário da água, a utilização de superplastificante na composição do BAC melhora a deformabilidade sem aumentar o risco de ocorrência de segregação (não altera significativamente a viscosidade). Para além disso, elevados conteúdos em água podem comprometer a resistência e durabilidade do betão.

2.3.5 Ar

A utilização de agentes introdutórios de ar no betão é importante nos casos em que se pretende elevada resistência à acção de gelo/degelo ou quando há falta de finos, permitindo corrigir a granulometria, melhorando a trabalhabilidade, devido ao efeito lubrificante de “rolamento de esferas” das bolhas de ar.

CAPÍTULO 3

CONCEPÇÃO DE UM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

3.1 MÉTODOS DESENVOLVIDOS PARA A CONCEPÇÃO DE COMPOSIÇÕES

A composição de um betão auto-compactável deve ser definida de forma a satisfazer um conjunto de requisitos, nomeadamente, auto-compactabilidade, resistência e durabilidade. De uma forma genérica a concepção de uma composição de BAC deve iniciar-se pelo levantamento dos requisitos de desempenho que se colocam ao betão com base nas condições estruturais, construtivas e ambientais. Estabelecidos os requisitos de desempenho, procede-se à selecção e caracterização dos materiais seguindo-se a definição preliminar de uma composição de betão. Numa última fase devem ser realizadas amassaduras experimentais por forma a verificar o cumprimento dos requisitos de desempenho (Nunes, 2001).

Diversos artigos científicos reportam aplicações práticas de BAC com sucesso, em todo o mundo, mas existem poucos estudos dedicados mais especificamente ao método de dimensionamento do BAC. As curvas de referência sugeridas para o betão convencional não servem para as novas variedades de betão, como o BAC. Por este motivo, têm sido adoptadas diferentes abordagens no estudo do BAC, em diferentes países. A maioria das abordagens, embora de forma “racional”, baseia-se num procedimento por tentativa-erro (ao nível da pasta, argamassa ou betão) para otimizar a composição do BAC.

As composições de BAC distinguem-se pela sua elevada deformabilidade, ausência de segregação e baixo risco de bloqueio. Para que se alcancem estas

propriedades deve-se limitar o volume de agregado grosso de forma a reduzir as colisões entre as partículas de agregado, o que reduz o risco de bloqueio e consequentemente aumenta o volume de pasta. Por outro lado a utilização de uma baixa razão água/finos e o uso de superplastificante potencia uma elevada deformabilidade e resistência à segregação, ver Figura 3.1 (Gettu e Agulló, 2003). O facto de, por um lado, as características de auto-compactabilidade dependerem dos componentes da mistura e por outro lado, a existência de uma grande diversidade de materiais no mercado, dificulta a determinação de um tipo de metodologia única para a concepção de um BAC. Contudo, podem estabelecer-se algumas características comuns de composições de BAC, fruto de diferentes trabalhos citados na literatura técnica.

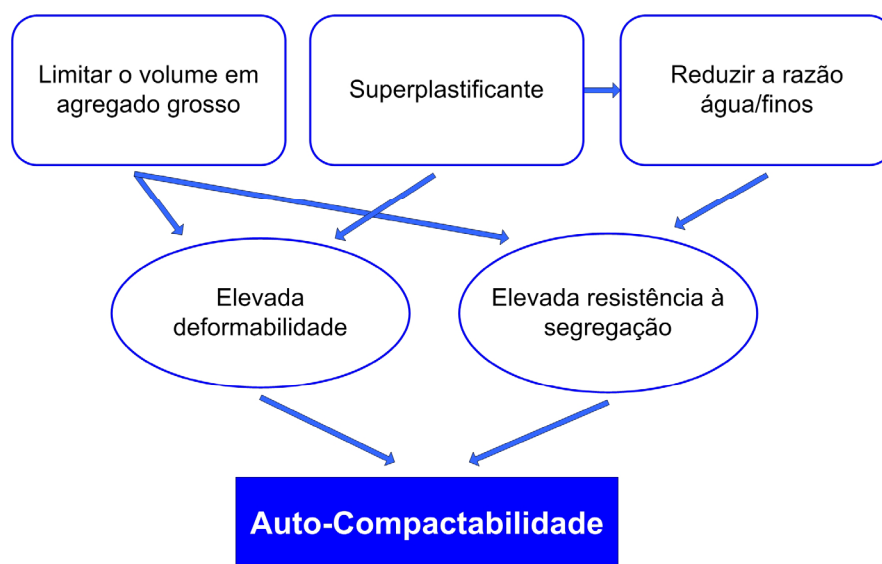


Figura 3.1 – Metodologia geral para obter betão auto-compactável (Skarendahl e Petersson, 2001)

Em termos gerais, o volume de pasta deve ser alto, entre os 30 a 40% do volume de betão, o que significa um elevado conteúdo de finos (conteúdo de cimento e adições), num intervalo entre $380\text{-}600\text{kg/m}^3$ podendo o conteúdo em cimento variar entre $200\text{-}450\text{kg/m}^3$. O elevado conteúdo em finos justifica-se para que a pasta exiba uma viscosidade e coesão adequadas, de forma a evitar a segregação dos agregados e diminuir os choques entre partículas de agregado grosso. O conteúdo de água deve corresponder ao intervalo de $150\text{-}210\text{kg/m}^3$. A relação água/finos determina-se, normalmente, de modo a pertencer ao intervalo entre 0.8 a 1.2 em volume. Para reduzir o risco de segregação a relação agregado fino/agregado grosso, no BAC, é normalmente da ordem de 1, significativamente mais alto que os habituais valores do betão convencional. Para além disso, a dimensão máxima do agregado grosso

empregue no BAC deverá estar geralmente compreendida entre 10 e 20mm. Estas restrições impõem-se sobre os agregados para reduzir o risco de segregação e bloqueio durante o fluxo do betão.

As metodologias de concepção de composições de BAC diferem dos métodos tradicionais empregues para o betão convencional, estando fundamentados numa base essencialmente empírica. Contudo, os critérios para o desenvolvimento de composições de BAC ainda não estão completamente definidos, de modo que os valores recomendados por algumas especificações constituem um ponto de partida.

Quadro 3.1 – Valores recomendados pela JCSE, BIBM *et al.* e RILEM

<i>Organização:</i>	<i>JCSE^(*)</i>		<i>BIBM et al.</i>		<i>RILEM</i>	
Materiais constituintes da composição	em volume (m ³ /m ³)	em massa (kg/m ³)	em volume (m ³ /m ³)	em massa (kg/m ³)	em volume (m ³ /m ³)	em massa (kg/m ³)
Agregado grosso	0.30-0.32	-	0.27-0.36	750-1000	0.30-0.34	750-920
areia 1	-	-	-	-	-	-
areia 2	-	-	-	-	-	-
agregado fino	-	-	-	-	-	710-900
Cimento	-	-	-	350-450	-	-
Adição	-	-	-	-	-	-
total de finos	0.16-0.19	-	-	380-600	-	450-600
água	-	155-175	0.15-0.21	150-210	-	150-200
superplastificante	-	-	-	-	-	-
Pasta	-	-	0.30-0.38	-	0.34-0.40	-
água/cimento	-	-	-	-	-	-
água/finos	0.85-1.15	-	0.85-1.10	-	0.80-1.20	-
Agregado fino/ Argamassa	-	-	-	-	0.40-0.50	-
Agregado fino/ total agregados	-	-	0.48-0.55	-	-	-

^(*) valores indicados para betão auto-compactável sem a utilização de um agente de viscosidade.

O Quadro 3.1 apresenta as indicações fornecidas por alguns organismos relativamente ao intervalo de valores possíveis para diferentes parâmetros da composição de um BAC, JSCE (Japanese Society of Civil Engineers) (Uomoto e Ozawa, 1998), cinco organizações europeias (BIBM - European Precast Concrete Organisation, CEMBUREAU – European Cement Association, ERMCO – European Ready-mix Concrete Organisation, EFCA – European Federation of Concrete Admixture Associations e EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005) e RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratoires for Materials and Structures) (Skarendahl e Petersson, 2001). Contrariamente ao betão

convencional, a composição de um BAC é geralmente estudada e definida em termos volumétricos, pelo que parte dos valores apresentados correspondem a relações estabelecidas em termos de volume.

De seguida são expostas as directrizes gerais dos métodos de concepção de composições de BAC mais amplamente divulgados, destacando-se as suas principais potencialidades e limitações.

3.1.1 Método proposto por *Okamura et al.*

O método de concepção de composições proposto pelo grupo de investigadores liderado pelo professor *Okamura*, foi provavelmente o primeiro método formulado especificamente para o betão auto-compactável. Depois da proposta inicial de *Okamura* em 1993, esta metodologia tem vindo a ser modificada por vários investigadores (Skarendahl e Petersson, 2001).

Segundo este método, cujo fluxograma é apresentado na Figura 3.2, o betão é considerado como um material de duas fases: agregado grosso e argamassa. Inicialmente fixa-se o teor em ar, sendo recomendado o intervalo de valores entre 4 a 7%, dependendo das condições de exposição ambiental. O volume real de agregado grosso utilizado, por unidade de volume de betão, é o correspondente a um volume aparente de 0.5m^3 , com as partículas compactadas, excluindo o ar previsto para a composição. Consequentemente a quantidade de agregado grosso depende do grau de empacotamento das partículas, isto é, das suas características físicas. Definido o teor de ar e o volume de agregado grosso, determina-se o volume de argamassa, considerando que o agregado fino (partículas com dimensão superior a $90\mu\text{m}$) ocupa 40% desse volume, correspondendo o restante volume à água e finos, onde está incluído o cimento.



Figura 3.2 – Fluxograma do método de concepção da composição proposta por Okamura *et al.* (Nawa, Izumi *et al.*, 1998).

Para finalizar a definição da composição de betão resta determinar a razão água/finos e a dosagem de superplastificante, que segundo este método deve ser ajustada recorrendo a ensaios na argamassa (ensaio de espalhamento e ensaio de fluidez). Utilizando estes dois ensaios e fazendo variar o conteúdo de superplastificante e a relação água/finos o objectivo é obter uma argamassa com uma elevada deformabilidade e simultaneamente suficiente viscosidade. A deformabilidade da argamassa é aferida usando um molde de forma tronco-cónica de dimensões reduzidas (Figura 3.3a). O diâmetro médio da área de espalhamento resultante, após a cessação do movimento, serve para calcular o índice de deformabilidade G_m (área de espalhamento relativa), recorrendo à Equação (3.1). Por seu lado, a viscosidade da argamassa é avaliada recorrendo ao ensaio de fluidez, ensaio em que é medido o tempo que a argamassa demora a escoar do interior de um funil com as dimensões interiores apresentadas na Figura 3.3b. Usando o valor do tempo de escoamento determina-se o índice de viscosidade R_m (tempo de escoamento relativo), calculado através da Equação (3.2). Ozawa *et al.* investigaram a relação entre a auto-compactabilidade do betão fresco e da argamassa, verificando que uma argamassa com diâmetro médio de ($G_m=5.0$) e tempo de escoamento de ($R_m=1.0$) é a mais adequada para conseguir um betão auto-compactável.

$$G_m = \left(\frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2} \right) \quad (3.1)$$

Onde G_m representa a área de espalhamento relativa da argamassa, d_1 e d_2 são os diâmetros de espalhamento em mm e d_0 corresponde ao diâmetro da base do cone (mm).

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (3.2)$$

Onde R_m é o tempo de escoamento relativo da argamassa e t o tempo de escoamento medido (s).

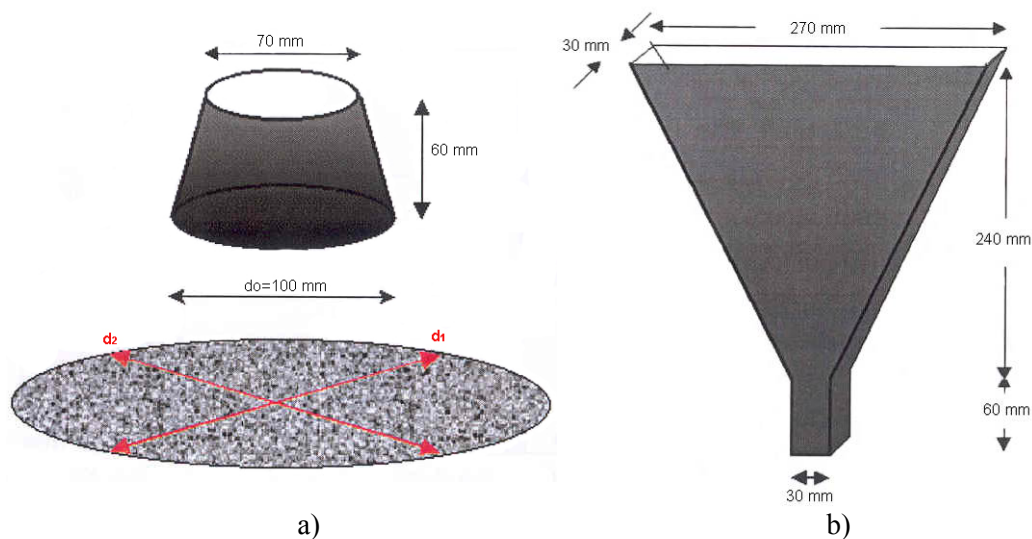


Figura 3.3 – Equipamentos utilizados nos ensaios nas argamassa: a) ensaio de espalhamento; b) ensaio de fluidez

Partindo destas proporções realizam-se ensaios de espalhamento e fluidez no betão, para corrigir a dosagem de superplastificante, e ensaios da caixa L e caixa U, para aferir a auto-compactabilidade da composição final. Será importante referir que a dosagem de superplastificante deve ser corrigida, uma vez que o seu efeito no betão é diferente do efeito na argamassa, devido às diferenças na forma de mistura e no próprio volume de material envolvido.

O método proposto por *Okamura* assenta em equipamentos e ensaios relativamente simples e de fácil execução, o que permitiu a sua rápida divulgação e aplicação. No entanto, esta metodologia conduz na generalidade dos casos a composições com volumes de pasta muito elevados, superiores aos exigidos para garantir a auto-compactabilidade e as propriedades do betão endurecido (Skarendahl e Petersson, 2001).

3.1.2 Método proposto pela JSCE

O método proposto pela Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis (JSCE) baseia-se em investigações realizadas e na experiência obtida com aplicações práticas do BAC no Japão. Em 1998 a JSCE publicou uma série de recomendações para a construção com BAC (JSCE, 1998), nas quais estabelece uma distinção entre os BAC fabricados com finos (*“powder-type SCC”*), com agente de viscosidade (*“viscosity agent-type SCC”*) e com ambos (*“combination-type SCC”*). As referidas recomendações estabelecem ainda três grupos de betão auto-compactável consoante o seu grau de auto-compactabilidade, Nível 1, 2 ou 3. O procedimento de concepção de composições de BAC tipo finos e tipo agente de viscosidade é apresentado esquematicamente na Figura 3.4.

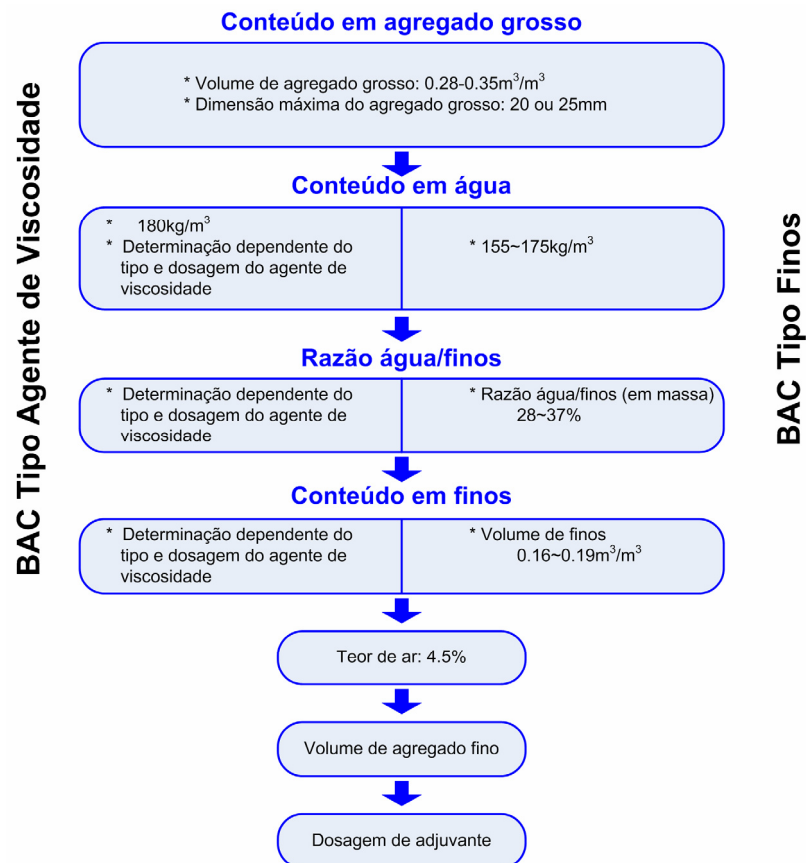


Figura 3.4 – Fluxograma do método de concepção da composição de BAC proposto pela JSCE (Nawa, Izumi *et al.*, 1998)

De acordo com este método o volume de agregado grosso, cuja dimensão máxima não deverá ultrapassar os 20 a 25mm, é seleccionado segundo o grau de auto-compactabilidade requerida. Para um grau elevado de auto-compactabilidade utiliza-se um conteúdo em agregado grosso entre os 28-30%, o qual pode ser aumentado até

35% no caso de betões em que se exige menor grau de auto-compactabilidade. O volume de água, volume de finos ou de ligante, por unidade de volume de betão, e a razão água finos variam consoante o tipo de BAC a realizar, isto é, do tipo finos ou do tipo agente de viscosidade (Nawa, Izumi *et al.*, 1998).

No caso de um BAC tipo agente de viscosidade as especificações relativamente ao agregado grosso são iguais às estabelecidas para o BAC tipo finos, enquanto que todos os outros componentes devem ser determinados em função da dosagem e tipo de agente de viscosidade utilizado. Quanto à dosagem do superplastificante e do agente de viscosidade, a JSCE recomenda que seja determinada com base na experiência e nas recomendações dos fabricantes dos produtos bem como em ensaios adequados, para que se atinja a resistência à segregação, fluidez e auto-compactabilidade requeridas.

3.1.3 Método proposto pelo CBI

O procedimento de concepção de betões auto-compactáveis proposto por *Petersson e Billberg* (Skarendahl e Petersson, 2001), conhecido como o método CBI, baseia-se no conceito de que o betão se encontra dividido numa fase sólida, constituída pelos agregados grossos e finos, e numa fase líquida que inclui os restantes constituintes. O desenvolvimento desta metodologia surge com o objectivo de conceber composições mais económicas, baseando-se na determinação de um esqueleto sólido granular para um volume de pasta mínimo, que garantam que o betão passe por entre as armaduras sem que ocorra bloqueio. Numa primeira fase deste método, determina-se o volume mínimo de pasta tendo em conta as propriedades dos agregados, critérios de durabilidade e as características da aplicação. Na segunda fase obtêm-se a composição da pasta baseando-se numa caracterização reológica e, finalmente na última fase, verificam-se as propriedades do betão no estado fresco e endurecido.

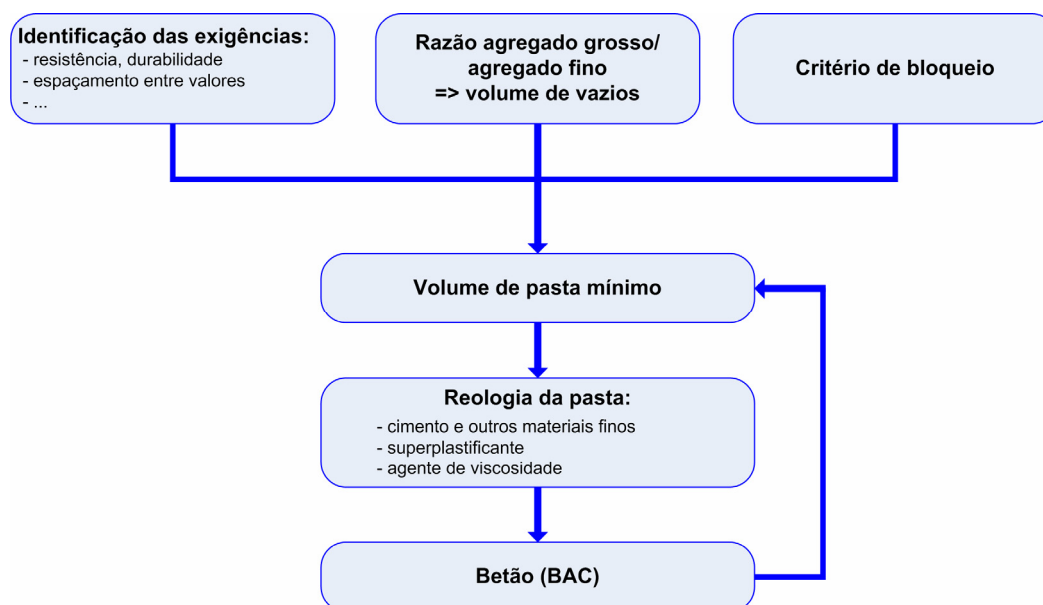


Figura 3.5 – Fluxograma do método de concepção da composição proposto pelo CBI (Petersson, Billberg *et al.*, 1996)

O método proposto pelo CBI, cujo fluxograma é apresentado na Figura 3.5, inicia-se com uma identificação das exigências do projecto, como a resistência e durabilidade requeridas, o espaçamento entre varões e espessuras de recobrimento. Para a determinação do volume mínimo de pasta, utiliza-se um modelo empírico que define a relação entre o risco de bloqueio para cada fracção de agregado e o espaçamento inter-partículas, tendo em conta o espaço através do qual o betão tem que fluir (por exemplo, espaçamento entre armaduras ou recobrimento). Factores como a dimensão máxima do agregado e a quantidade de partículas de maior dimensão, desempenham um papel determinante na capacidade do betão escoar através de uma secção armada. Para o mesmo volume de agregado, um maior volume de partículas grandes resulta numa redução da quantidade de pasta necessária (devido a uma redução da superfície específica), mas o risco de bloqueio é maior. Assim, o risco de bloqueio pode ser avaliado fazendo uso de um conjunto de expressões propostas e de um gráfico que traduz o risco de bloqueio associado a diferentes materiais, para diferentes relações entre espaçamento da armadura e dimensão das partículas (Tangtermsirikul, 1998).

Baseando-se nas características da aplicação em vista, fixa-se a máxima relação água/cimento, o tipo de cimento e o teor em ar. As quantidades de finos, água, superplastificante e outros adjuvantes são ajustadas mediante ensaios reológicos em pastas de forma a obter as propriedades pretendidas no estado fresco e endurecido. Este tipo de abordagem, do ponto de vista da reologia, é mais exigente em termos de equipamento mas permite uma avaliação mais precisa das propriedades da pasta. Por

último, depois de definida a relação entre agregados e otimizado o volume e composição da pasta, verifica-se a auto-compactabilidade do betão mediante ensaios de espalhamento e da caixa-L, cujos critérios de aceitação podem ser adaptados consoante o tipo de aplicação. Em termos da reologia do betão fresco procura-se obter, neste método, um material com uma tensão de corte inferior a 12Pa e com uma viscosidade plástica entre 150 a 250Pa.s, aplicando o modelo de *Bingham* (Skarendahl e Petersson, 2001).

A economia nos materiais conseguida pela utilização deste método, contrabalança com o processo moroso na obtenção das curvas de referência relativas ao critério de bloqueio, para agregados de diferentes naturezas. Trata-se de uma metodologia bastante eficiente do ponto de vista económico, aplicável a diferentes tipos de materiais, mas cuja implementação e aplicação não é trivial.

3.1.4 Método proposto pelo LCPC

Sedran e os seus colaboradores desenvolveram, no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) de Paris, uma metodologia para a concepção de composições de betão auto-compactável, baseada num novo tipo de reómetro e num programa computacional para otimizar as misturas (Sedran e Larrard, 1999). Estes investigadores, por um lado, procuravam reduzir a elevada retracção potencial do BAC e por outro lado, encontravam-se insatisfeitos com alguns dos ensaios utilizados, para verificar as propriedades do BAC e representar de forma adequada as condições de colocação em estruturas específicas. O método proposto pelo LCPC consiste em utilizar um modelo computacional (“Compressible Packing Model”) para determinar um esqueleto granular compacto com o mínimo de vazios, considerando o efeito de parede, a viscosidade e deformabilidade da mistura, determinadas através de um reómetro de grandes dimensões (“BTRHEOM”). Na Figura 3.6 apresenta-se o fluxograma com as directrizes gerais do método.

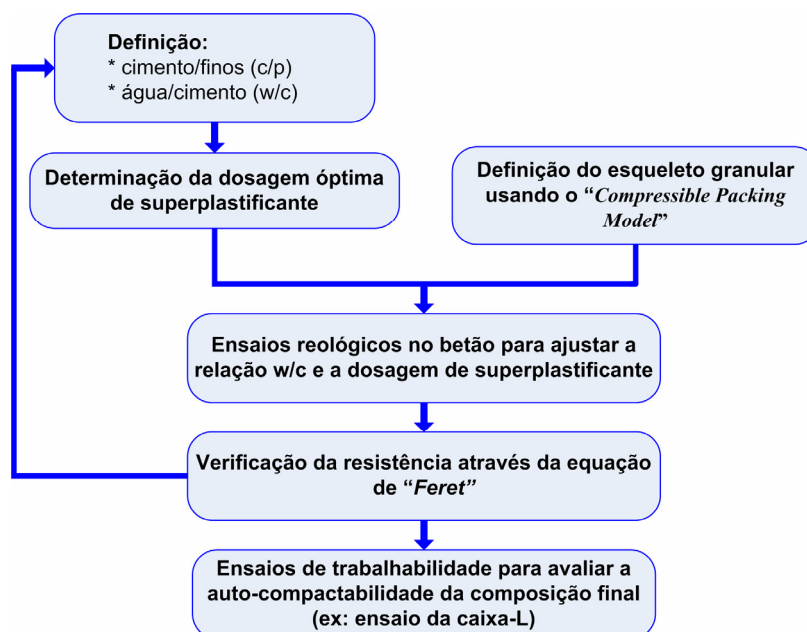


Figura 3.6 – Fluxograma do método de concepção da composição de BAC proposto pelo LCPC (Sedran, 2000)

No procedimento de optimização da composição fixam-se inicialmente as relações cimento/finos e água/cimento e determina-se a dosagem de superplastificante, utilizando o ensaio do cone de *Marsh*. A combinação óptima de agregados é obtida através de um programa computacional, baseado num modelo matemático para optimizar o esqueleto granular, que analisa as interacções entre os diferentes componentes da mistura para prever a combinação com maior densidade. Para realizar esta previsão é necessário introduzir no programa as características dos componentes, como a baridade, a massa volúmica, a absorção e a curva granulométrica (Sedran, 2000).

Posteriormente, através de ensaios no betão fresco, utilizando o reómetro BTRHEOM e considerando o betão um fluido de *Bingham*, ajusta-se a relação água/cimento e a dosagem de superplastificante. A composição de betão é definida determinando-se como parâmetros reológicos a tensão de corte e a viscosidade plástica (Sedran, 2000). Finalmente, calcula-se a resistência à compressão esperada para a mistura optimizada, empregando a equação de *Feret* e caso a resistência não corresponda à desejada, repete-se a optimização com outra relação água/cimento. A verificação e ajuste final da composição realiza-se com alguns ensaios, como o ensaio de espalhamento e o ensaio da caixa-L (Skarendahl e Petersson, 2001).

3.1.5 Método proposto pela UPC

Investigadores da Universidade Politécnica da Catalunha desenvolveram uma metodologia de concepção de composições de BAC de alta resistência fundamentando-se no emprego de técnicas de ensaio simples e sensíveis (Gomes, 2002). Este método assume que o betão é um material bifásico, baseando-se na optimização separada da composição da pasta e do esqueleto sólido. A pasta constituída por cimento, sílica de fumo (no caso de betão de alta resistência), outros finos, água e superplastificante deve ser capaz de proporcionar ao betão a necessária fluidez e coesão. O esqueleto sólido é definido pela relação óptima entre agregado fino e agregado grosso, que proporciona à estrutura a máxima compacidade em seco e sem compactação. Na Figura 3.7 apresentam-se as directrizes gerais para concepção de um betão auto-compactável segundo o método proposto pela UPC.

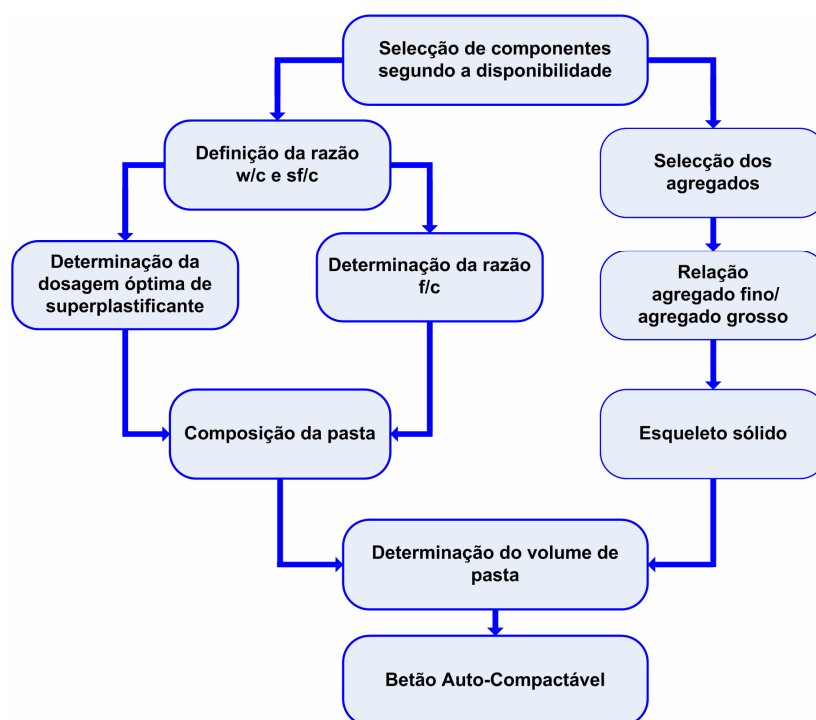


Figura 3.7 – Fluxograma do método de concepção da composição de BAC proposto pela UPC (Gomes, 2002)

Inicialmente começa-se por fixar a relação água/cimento com vista a satisfazer os requisitos de resistência e durabilidade, e no caso de betões de elevada resistência define-se uma percentagem de 10% da massa de cimento de sílica de fumo (valor considerado óptimo tendo em conta a relação custo/benefício). A utilização do cone de *Marsh* e do ensaio de espalhamento em pastas (*mini-slump*) permite obter, respectivamente, as relações superplastificante/cimento e filer/cimento que dão lugar

a misturas com máxima deformabilidade sem segregação e com um nível de coesão interna que não prejudique significativamente a fluidez do material. Segundo este método, no ensaio do *mini-slump* a pasta escolhida deve exibir um espalhamento final de $180\text{mm} \pm 10\text{mm}$ e um tempo de alcance do diâmetro de 115mm (T_{115}) de $3\text{s} \pm 1\text{s}$ (Gomes, 2002).

A composição do esqueleto granular em termos da relação agregado fino/agregado grosso determina-se segundo o critério de máxima compacidade em seco e sem compactação, de forma a propiciar o mínimo conteúdo em vazios. Uma vez definida a composição da pasta e a relação agregado fino/agregado grosso, realizam-se composições de betão com distintos volumes de pasta, tomando como composição otimizada, aquela que cumpra os requisitos de auto-compactabilidade e resistência, com um mínimo conteúdo em pasta.

3.1.6 Limitações dos métodos propostos

Os métodos apresentados, correspondem aos processos de optimização de composições de BAC mais divulgados e utilizados em todo o mundo. Contudo estes métodos apresentam algumas limitações que devem ser superadas, com vista à obtenção de um metodologia mais racional e fácil de aplicar e que conduza a composições de BAC mais económicas.

Na generalidade dos procedimentos, a concepção do BAC atende fundamentalmente aos requisitos exigidos no estado fresco, requisitos que assegurem a adequada auto-compactabilidade do betão. Parâmetros como capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos, são muito sensíveis às variações dos materiais constituintes e a alterações no processo de produção, exigindo um rigoroso controlo na sua determinação. As metodologias, baseadas nos requisitos de auto-compactabilidade, conduzem usualmente a um volume de pasta elevado, responsável por um maior custo dos materiais e promovendo maiores deformações por fluência, retracção e a geração de maior calor de hidratação. Por outro lado, o bom desempenho do BAC no estado fresco conduz na generalidade dos casos a composições com resistências à compressão muito superiores às exigidas, resultante de teores sobrestimados dos materiais, especialmente do cimento e superplastificante.

Ressalta assim, a importância de estudar diferentes metodologias de optimização de composições de BAC, procurando aliar a qualidade requerida para o material nos estados frescos e endurecido, com economia e viabilidade de produção.

3.1.7 Linhas de investigação seguidas mais recentemente

Diversos trabalhos recentes destacam a importância do estudo da reologia das pastas na avaliação do efeito dos diferentes materiais constituintes do BAC, (Ferraris, 2001), (Saak, 2000) e (Golaszewski e Szwabowski, 2004), dado que permite uma aferição clara do efeito de cada constituinte e da sua dosagem. A pasta assume um papel determinante no comportamento do betão enquanto fresco, durante a cura e no estado endurecido. No caso do BAC o conteúdo em pasta é, regra geral, maior quando comparado com um betão convencional, e daí a influência da pasta no comportamento do BAC assumir uma importância ainda maior. Por outro lado, a elevada trabalhabilidade do BAC é controlada fundamentalmente pela razão água/cimento, quantidade de finos e dosagem de Sp. Segundo *Wallevik* (2003b) a reologia da pasta de cimento é influenciada pelos seguintes factores:

- Distribuição granulométrica das partículas;
- Volume de partículas relativamente ao volume total;
- Forma das partículas e sua composição química;
- Solubilidade (dos iões da superfície);
- Grau de floculação (inicial) e capacidade de dispersão dos flocos;
- História de tensões;
- Tipo de adjuvante;
- Adições minerais;
- Homogeneidade/estabilidade no que respeita à segregação.

As pastas exibem um comportamento não-newtoniano, ou seja, a viscosidade é função da taxa de deformação específica a que a pasta está sujeita. Em geral, os ensaios tradicionais de avaliação das propriedades da pasta no estado fresco permitem medições da viscosidade para uma determinada taxa de deformação, enquanto que o betão desde o fabrico até à sua colocação sofre taxas de deformação variáveis (Figura 3.8). *Wallevik* (2003a) refere que durante a colocação o betão está sujeito a taxas de deformação da ordem de 3 a 20Hz e no caso do BAC estas podem descer para valores da ordem de 1 a 0.5Hz. Utilizando um reómetro é possível, na mesma amostra, realizar medições da viscosidade para uma gama alargada de taxas de deformação.

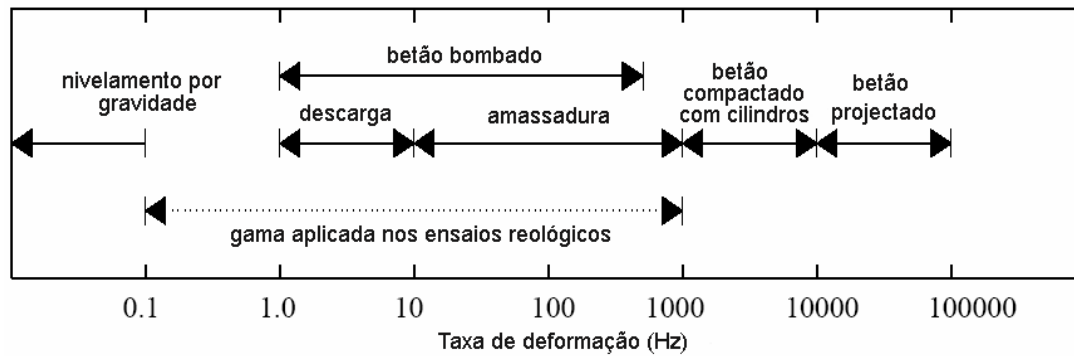


Figura 3.8– Gama das taxas de deformação associadas a diferentes processos (Saak, 2000)

Wallevik (2003b) realizou algumas pesquisas com o intuito de saber de que forma varia o valor da tensão e da viscosidade plástica, quando se adiciona água, ar, superplastificante e sílica de fumo numa composição de betão (Figura 3.9a). Estes quatro constituintes, quando adicionados a uma composição de referência, influenciam de forma significativamente diferente o comportamento do betão. Segundo esta ilustração, a adição de superplastificante reduz essencialmente a tensão de cedência, deixando praticamente constante a viscosidade plástica, no entanto no caso do estudo se realizar em pastas, os superplastificantes (Sp) reduzem também a viscosidade plástica (Figura 3.9b).

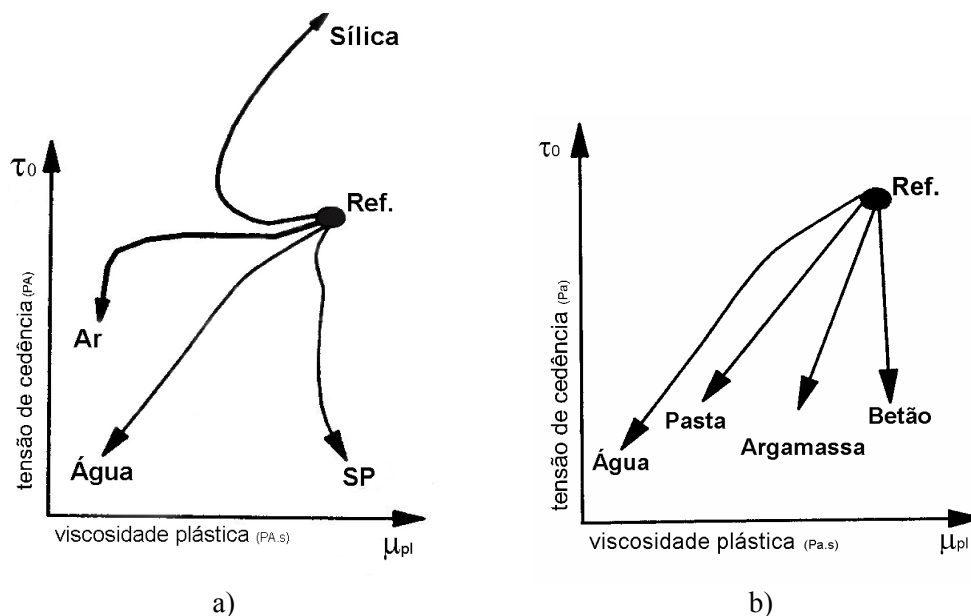


Figura 3.9 – a) Efeito da adição de água, ar, sílica e superplastificante na tensão de cedência e viscosidade plástica de uma composição de betão de referência; b) Diferenças na tensão de cedência e viscosidade plástica quando se adiciona superplastificante à pasta, argamassa e betão (Wallevik, 2003)

Na Figura 3.9b pode-se observar as diferenças no comportamento do betão, argamassa e pasta perante uma adição de superplastificante. A avaliação do comportamento reológico de BAC utilizando ensaios reológicos em pastas deve ser cuidada e utilizada com precaução, dado que a relação entre a reologia da pasta e do betão não é linear. Nas pastas as forças coloidais e os processos de coagulação dominam a reologia, enquanto que a reologia do betão fresco é essencialmente dominada pelo volume de pasta e pela fricção entre o sistema de partículas (Wallevik, 2003).

Em Portugal o estudo reológico de pastas de cimento iniciou-se por Santos *et. al* em 2004 (Santos, Lopes *et al.*, 2004a) no âmbito do projecto BACPOR. Com o objectivo de avaliar e caracterizar a influência de diferentes constituintes nas pastas foi realizado um estudo reológico abrangendo diferentes fracções minerais, diferentes razões água/cimento e diferentes superplastificantes. Algumas das conclusões retiradas deste estudo reológico em pastas são apresentadas em seguida.

O tipo de cimento e a dosagem de superplastificante são dois dos parâmetros a que se dá especial relevância nesta investigação e de inquestionável importância na formulação de composições de BAC. Nas figuras que se seguem apresentam-se os viscogramas de seis pastas de cimento realizadas com diferentes tipos de cimentos, para uma razão $w/c=0.35$ e sem superplastificante (Figura 3.10a), e para uma razão $w/c=0.35$ com uma dosagem de superplastificante $Sp/c=0.35\%$ (V3000) (Figura 3.10b).

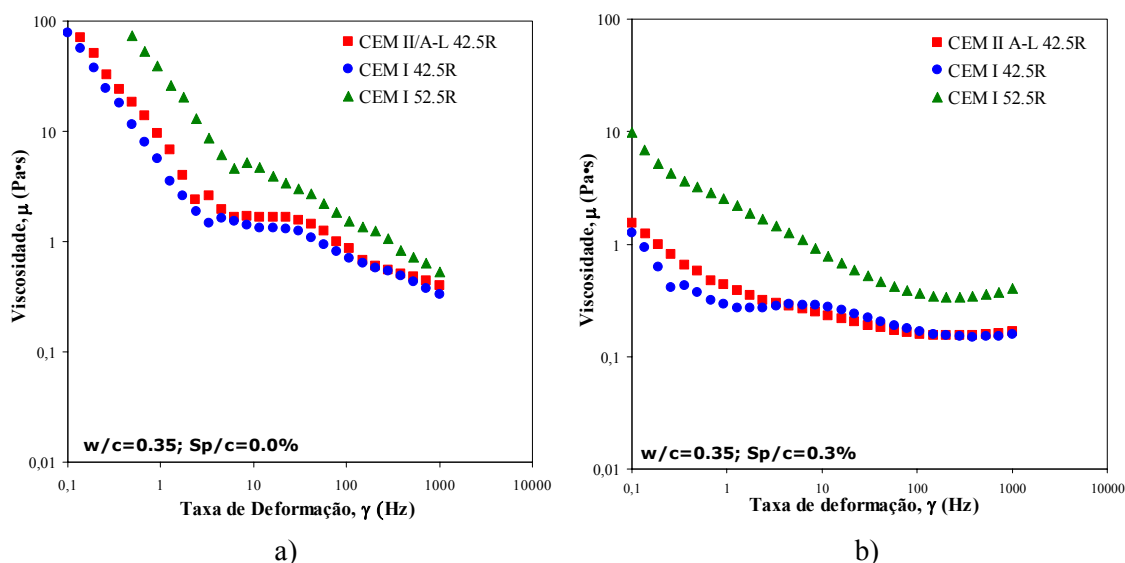


Figura 3.10 – Viscogramas de pastas com diferentes cimentos: a) com $w/c=0.35$ e $Sp/c=0\%$; b) com $w/c=0.35$ e $Sp/c=0.3\%$ (V3000) (Santos, Lopes *et al.*, 2004b)

Os valores das taxas de deformação impostas e das respectivas viscosidades observadas são representadas em escala logarítmica para que o comportamento das pastas na gama das baixas taxas de deformação possa ser melhor avaliado. Analisando os dois viscogramas, pode concluir-se por um lado, que o tipo de cimento pode influenciar consideravelmente a viscosidade da pasta e por outro lado, observa-se que a utilização de superplastificante promove um decréscimo na viscosidade.

A inclusão de certas adições no betão, como por exemplo, cinzas volantes, filer calcário, escórias de alto-forno, sílica de fumo, é cada vez mais frequente por questões ambientais e no caso do BAC para aumentar a quantidade total de finos. O desempenho das adições minerais depende da sua curva granulométrica, forma das partículas, textura superficial, superfície específica e reactividade. No entanto o comportamento de cada adição não pode ser previsto atendendo apenas às suas características física e químicas, mas somente pode ser determinado usando ensaios apropriados, como é o caso dos ensaios reológicos. A Figura 3.11a apresenta os viscogramas de pastas com diferentes percentagens de substituição de cimento por filer calcário, podendo observar-se que a incorporação de filer calcário provoca um decréscimo da viscosidade das pastas. Representando-se os valores da viscosidade a taxas de deformação de 16 e 108Hz, para as pastas com diferentes percentagens de substituição de filer, conclui-se que a partir de 40% de substituição a viscosidade da pasta não sofre alterações significativas (Figura 3.11b).

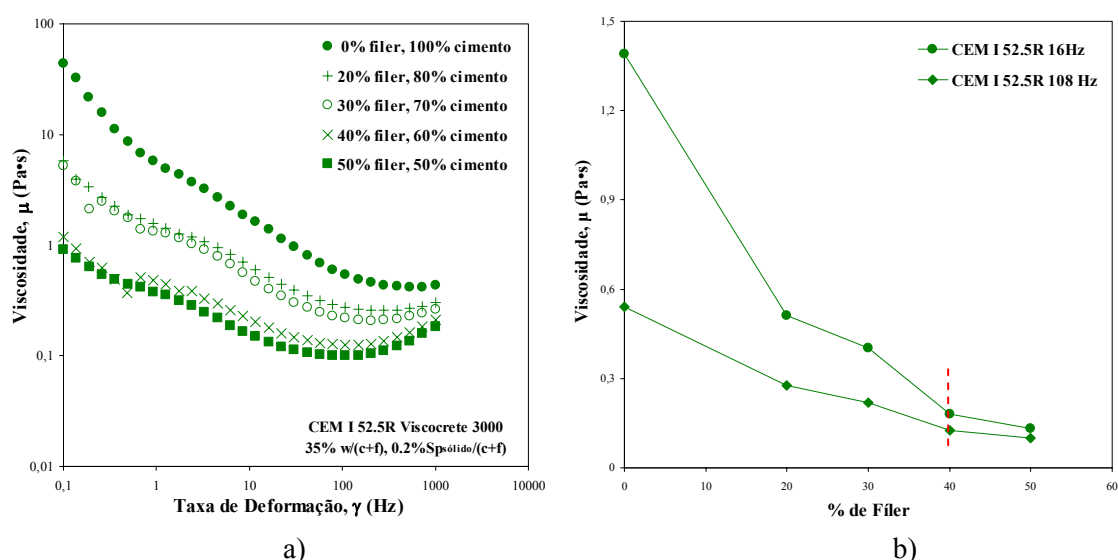


Figura 3.11 – Medição da viscosidade em pastas com diferentes percentagens de filer calcário: a) taxas de deformação dos 0.1-1000Hz; b) taxas de deformação de 16 e 108Hz (Santos, Lopes *et al.*, 2004b)

Durante a concepção de uma composição, a decisão relativamente ao valor a adoptar para a percentagem de substituição de cimento por uma adição pode basear-se na análise de gráficos como este e nas exigências em termos de resistência.

Uma outra linha de investigação que tem despertado actualmente muito interesse baseia-se na utilização de ferramentas estatísticas para definir modelos matemáticos que avaliem a influência de cada um dos parâmetros da composição nas propriedades frescas e endurecidas do BAC. Esta estratégia tem vindo a ser seguida por diversos autores (Bayramov, Tasdemir *et al.*, 2003; Khayat, Ghezel *et al.*, 2000; Sonebi, 2001; Sonebi, 2004) com vista a dimensionar e otimizar composições, correlacionar diferentes características de auto-compactabilidade, analisar o efeito de alterações nos parâmetros da mistura e avaliar o comportamento de novos materiais no betão, como novos superplastificantes ou agentes de viscosidade.

Dado que na concepção de uma composição de BAC estão envolvidos vários parâmetros, a abordagem mais correcta consiste em conduzir as experiências segundo um plano factorial. Trata-se de uma estratégia experimental onde são introduzidas variações nos diversos parâmetros, simultaneamente, e não apenas em um de cada vez. As experiências conduzidas segundo o plano factorial permitem recolher informação de boa qualidade que, posteriormente, pode ser analisada recorrendo a métodos estatísticos (regressões lineares, análises de variância e análises de resíduos). A partir destas análises estabelece-se modelos matemáticos que definem o comportamento fresco e endurecido das misturas perante alterações nos seus parâmetros.

3.2 MÉTODO PROPOSTO PELA FEUP

3.2.1 Motivação

O estudo da tecnologia inovadora do BAC na FEUP iniciou-se em 1999 com Nunes (2001) tendo despertado, desde logo, o interesse da indústria de construção civil nacional pelo assunto. Inicialmente, o estudo das composições baseou-se na metodologia proposta por Okamura *et al.* (2000), por se tratar de um método simples, necessitando apenas de equipamentos de ensaio de fácil construção. Das primeiras experiências realizadas, por aplicação directa deste método, resultaram composições com um elevado conteúdo de pasta e, por isso, pouco eficientes do ponto de vista económico e do próprio comportamento do betão endurecido.

Segundo a metodologia proposta por *Okamura et al.*, o valor adequado do volume de agregado grosso, para alcançar um nível de auto-compactabilidade elevado, é o correspondente a um volume aparente de 0.50m^3 . Contudo, este valor foi recomendado para agregados cuja dimensão máxima seja próxima de 20mm, isto é, trata-se de um valor que poderá ser alterado quando a dimensão máxima das partículas for inferior. Utilizando agregados de menores dimensões, menor é a probabilidade de colisão entre as partículas ou a ocorrência de bloqueio, para as mesmas condições fronteira. Na investigação desenvolvida na universidade de Delft por *Takada et al.* (1998), com agregados de dimensão máxima de 16mm, verificou-se que o valor do volume aparente inicialmente proposto de 0.50m^3 poderia ser aumentado para valores de 0.55 a 0.58m^3 . Este acréscimo permitiu uma redução de cerca de 10% do volume de pasta. Deste modo, e à semelhança do que aconteceu noutros países, (*Takada, Pelova et al.*, 1998), (EFNARC, 2002) foi necessário ajustar os valores dos parâmetros da proposta geral de *Okamura et al.*

Ao longo deste trabalho será descrita a metodologia, baseada no método de *Okamura et al.*, que tem vindo a ser desenvolvida na FEUP no âmbito do projecto BACPOR (Nunes, Figueiras *et al.*, 2004; Nunes, Figueiras *et al.*, 2005). Tem-se procurado estabelecer um método simples para definição da composição do BAC, à semelhança dos métodos existentes para o betão convencional, baseado em procedimentos e equipamentos acessíveis que facilmente possam ser implementados nas indústrias do betão pronto e da pré-fabricação. A metodologia desenvolvida pretende por um lado, facultar a utilização da grande variedade de materiais existentes no mercado português e por outro lado, conceber composições económicas capazes de competir com o betão convencional.

3.2.2 Bases da metodologia proposta

Em face da diversidade dos materiais existentes no mercado português e da forte concorrência económica, tornou-se imperativo evoluir em termos da metodologia de estudo das composições de BAC. A optimização da composição desenvolveu-se ao nível da pasta, argamassa e betão, recorrendo a ensaios simples e a ensaios mais sofisticados para medição de parâmetros reológicos. Por um lado, utilizando alguns dos estudos desenvolvidos por *Santos et al.* (2004b) procedeu-se à caracterização dos parâmetros reológicos de pastas de cimento e adições, o que constituiu uma informação valiosa no que respeita à selecção da dosagem do superplastificante, efeito das várias adições, trabalhabilidade e estabilidade do betão fresco. Por outro lado, foi desenvolvido um procedimento para optimização da composição de um BAC no qual fazem-se variar as proporções dos diferentes

materiais, no sentido de alcançar as características da auto-compactabilidade e, simultaneamente, atender a outras condicionantes como a classe de resistência e o custo mínimo. A metodologia apresentada destina-se a composições de BAC do tipo “Finos”, ou seja, a viscosidade é conseguida à custa de uma quantidade maior de finos e sem a ajuda de adjuvantes agentes de viscosidade.

O método proposto foi utilizado no estudo de diversas composições envolvendo um conjunto muito alargado de materiais, que incluíam vários tipos de cimentos e adições, agregados rolados e britados, graníticos e calcários. As composições desenvolvidas destinavam-se quer à pré-fabricação como à indústria do betão-pronto.

3.2.2.1 Requisitos de desempenho e caracterização dos materiais

Numa primeira fase deve ser realizado um levantamento dos principais requisitos a nível estrutural, ambiental e construtivo, permitindo definir parâmetros como resistência à compressão, dimensão máxima do agregado, classe de exposição ou nível de auto-compactabilidade. Posteriormente devem ser seleccionados e caracterizados os materiais a utilizar em função dos requisitos da obra e da disponibilidade dos materiais na região. No que diz respeito aos agregados, estes devem permitir, tanto quanto possível, obter uma curva granulométrica contínua com vista a obter uma mistura compacta, com menor volume de vazios. A resistência à compressão, dimensão máxima do agregado e classe de exposição, permitem definir valores máximos para a razão água/cimento e volume de vazios.

O nível de auto-compactabilidade é um parâmetro que deve ser ajustado ao tipo de estrutura a betonar, sua geometria e densidade de armadura, e ao processo construtivo que lhe está subjacente. Na Figura 3.12 apresentam-se os valores recomendáveis para os ensaios de espalhamento e funil no caso de quatro aplicações distintas (Walraven, 2003).

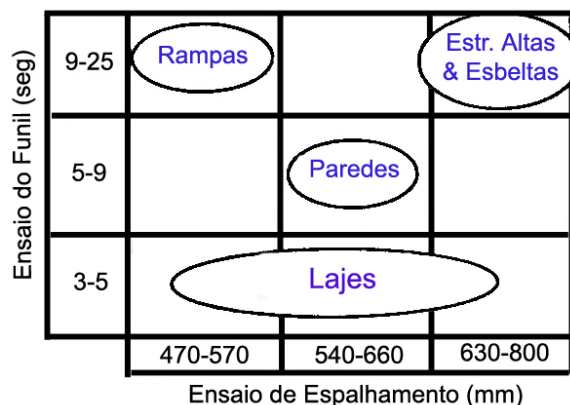


Figura 3.12 – Intervalos de valores recomendados para o ensaio do funil e ensaio de espalhamento atendendo ao tipo de aplicação (Walraven, 2003)

3.2.2.2 Estudos em pastas

Após a definição dos requisitos de desempenho, selecção e caracterização dos materiais a utilizar, procede-se a um estudo ao nível das pastas. Recorrendo a ensaios simples, como o ensaio de espalhamento e o ensaio de fluidez, e a ensaios mais sofisticados para caracterização dos parâmetros reológicos, pretende-se avaliar a influência dos diferentes constituintes no comportamento fresco da pasta. Estes ensaios permitem estabelecer valores indicativos que auxiliam na decisão relativamente ao valor a adoptar para a percentagem de substituição de cimento pela adição, à dosagem de superplastificante a utilizar e à necessidade de água da composição de finos.

De seguida apresenta-se o fundamento de cada ensaio, mostrando-se de que forma permitem avaliar o comportamento da pasta. Os procedimentos de amassadura e de execução dos ensaios de espalhamento e de fluidez encontram-se descritos nos Anexos B e D respectivamente.

1) Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento em pastas pode ser utilizado para estudar as propriedades físicas de cada composição de materiais finos (cimento e adições), através da medição do diâmetro de espalhamento das pastas para diferentes razões volumétricas água/finos (V_w/V_p), sem a adição de superplastificante, conforme ilustra a Figura 3.13a. A partir do diâmetro médio de espalhamento (média de d_1 e d_2), pode ser calculada a área de espalhamento relativa (G_p), através da Equação (3.3). O conjunto de pontos correspondentes aos pares de resultados experimentais (G_p , V_w/V_p) podem ser ajustados por uma recta, cuja equação permite calcular o valor

dos parâmetros β_p e E_p , em que β_p corresponde à ordenada na origem e E_p à inclinação da referida recta, tal como ilustrado na Figura 3.13b. O valor de β_p representa a capacidade de retenção de água dos materiais finos, enquanto que o E_p é um factor de deformabilidade que indica em que medida a viscosidade da pasta é sensível a variações da razão água/finos.

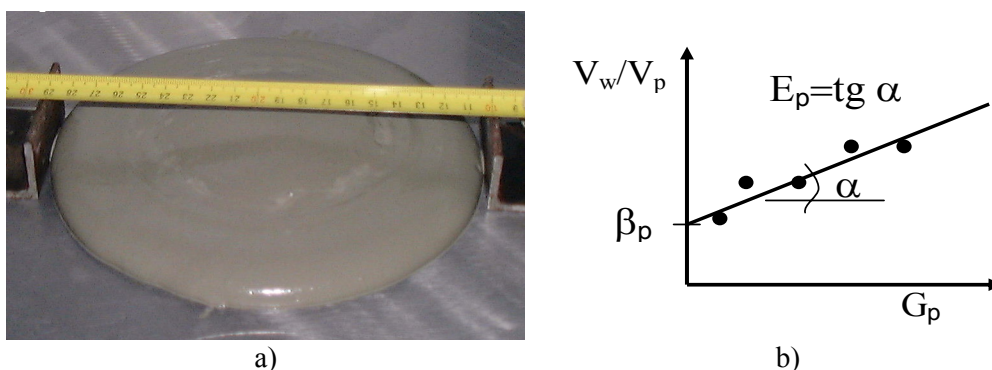


Figura 3.13 – a) Ensaio de espalhamento da pasta; b) Determinação de β_p e E_p

$$G_p = \left(\frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2} \right) \quad (3.3)$$

Onde G_p representa a área de espalhamento relativa da pasta, d_1 e d_2 são os diâmetros de espalhamento em mm e d_0 corresponde ao diâmetro da base do cone (mm).

No Quadro 3.2 são apresentados os valores β_p e E_p para diferentes composições de finos. Verifica-se, no caso das composições de finos estudadas, que a substituição do mesmo cimento por filer calcário reduz a necessidade de água dos finos, pois o valor de β_p diminui, até uma percentagem de substituição de cerca de 40%. Em termos dos valores de E_p observam-se também diferenças significativas, evidenciando maior sensibilidade a uma variação do V_w/V_p das pastas com percentagens superiores de substituição de filer. Para composições com diferentes adições ou diferentes cimentos observa-se igualmente uma alteração no valor de β_p , isto é, a necessidade de água dos finos varia significativamente. No caso, por exemplo, da composição com CEM II 32.5 e 40% de cinzas volantes obteve-se um valor de β_p e E_p bastante inferior ao obtido para a mesma percentagem de substituição mas com filer calcário. A explicação poderá residir no facto das cinzas possuírem um efeito lubrificante, devido à sua forma esférica, reduzindo a necessidade de água da composição e aumentando a deformabilidade para a mesma razão água/finos.

Quadro 3.2 – Resultados do ensaio de espalhamento da pasta para diferentes composições de finos

Composição dos finos	β_p	E_p
100% CEM II 32.5	1.04	0.048
80% CEM II 32.5 + 20% filer calcário (Micro100)	0.95	0.050
70% CEM II 32.5 + 30% filer calcário (Micro100)	0.93	0.053
60% CEM II 32.5 + 40% filer calcário (Micro100)	0.91	0.061
60% CEM II 32.5 + 40% cinzas volantes	0.82	0.041
80% CEM I 52.5 R+20% filer calcário (Micro 100)	1.24	0.150

Para composições com CEM I 52.5 R e 20% de filer calcário os parâmetros β_p e E_p tomaram o valor de 1.24 e 0.150, respectivamente. O mesmo ensaio realizado com composições de CEM II 32.5 e filer calcário conduziu a valores de β_p da ordem de 0.95 e $E_p=0.05$. Daqui pode concluir-se que o CEM I 52.52 R apresenta uma exigência de água maior para se obter a mesma deformabilidade, o que poderá ser justificado pela maior superfície específica deste cimento.

A percentagem de substituição escolhida deve ser aquela que conduza ao melhor comportamento em fresco mas para uma razão água/cimento que não comprometa as propriedades mecânicas e de durabilidade requeridas.

2) Ensaio de fluidez

O ensaio de fluidez em pastas, também designado por ensaio do cone de *Marsh*, tem sido utilizado desde os anos 60 como um método simples e prático para avaliar a fluidez de caldas, principalmente pela indústria petrolífera. O método baseia-se na medição do tempo necessário para que um determinado volume de material escoe através de um funil (Figura 3.14). Por conseguinte, o tempo de escoamento é tomado como o inverso da medida relativa da fluidez da calda ou pasta, isto é, quanto menor for o tempo de escoamento, maior a fluidez. O método é descrito na norma francesa, NF P 18-358 (1985) e na norma europeia NP EN 445 (2000) para a determinação da fluidez das caldas de injeção para rochas e cabos de pré-esforço. Uma metodologia semelhante é apresentada na norma ASTM C 939 (1987).

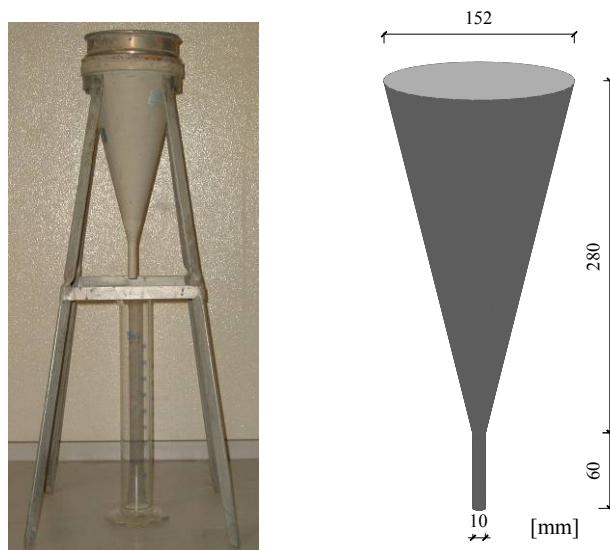


Figura 3.14 – Cone de *Marsh* utilizado no ensaio de fluidez e respectivas dimensões

A aplicação do cone de *Marsh* à tecnologia do betão surgiu nos anos 90 com o desenvolvimento do betão de elevado desempenho, de elevada resistência e elevada trabalhabilidade, como parte integrante do processo de estudo da composição. A utilização deste ensaio justifica-se pela consideração de que a trabalhabilidade elevada do betão é controlada pela composição da pasta ou argamassa.

As principais vantagens do ensaio de cone de *Marsh* são a simplicidade do equipamento, a facilidade de transporte, o facto de envolver uma pequena quantidade de material e empregar um procedimento de ensaio fácil de implementar e repetir. Como desvantagens deste ensaio são de referir a não aplicabilidade a pastas de baixa fluidez e a sensibilidade dos resultados à rugosidade da superfície do cone (Gomes, 2002).

No caso particular do betão auto-compactável este ensaio pode ser utilizado na selecção do superplastificante e determinação da sua dosagem de saturação. Na Figura 3.15 representa-se o logaritmo do tempo de escoamento de um dado volume de pasta para diferentes dosagens de superplastificantes, representadas pela razão do teor em sólidos de superplastificante pela massa de cimento (Sp/c). Como se pode observar, em geral, o tempo de escoamento decresce com o aumento da dosagem de superplastificante. No entanto, a partir de um determinado limite o tempo de escoamento deixa de variar significativamente e esta dosagem particular é designada por dosagem de saturação. Neste caso todos os superplastificantes exibem a mesma dosagem de saturação, $Sp_{sólido}/c=0.3\%$, embora as misturas que contêm V3002 sejam sempre mais fluidas.

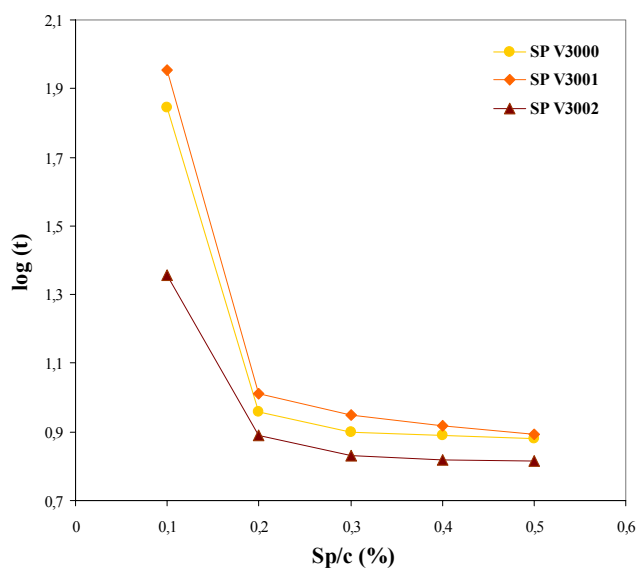


Figura 3.15 – Variação do tempo de escoamento da pasta função da dosagem e tipo de superplastificante

A determinação da dosagem de saturação, ou o ponto de saturação, é usualmente subjectiva, dependendo da forma da curva e do critério do investigador. Existem diferentes critérios para a definição do ponto correspondente à dosagem de saturação, dos quais podem referir-se o método proposto pela *AFREM* (Larrard, Bosc et al., 1997), por *Aïtcin* (1998) e por *Gomes et al.* (2002). Para aplicação da metodologia de concepção de composições de BAC que agora se propõe, utilizou-se o método proposto pela *AFREM* para determinação da dosagem de saturação do superplastificante. Segundo o método da *AFREM* (Larrard, Bosc et al., 1997), para a determinação da dosagem de saturação devem representar-se os pares de resultados experimentais $\log(t)$ (logaritmo decimal do tempo de escoamento) versus a percentagem do conteúdo sólido do superplastificante relativamente à massa de cimento e unir os pontos por segmentos de recta. O primeiro ponto do último segmento de recta que apresente uma inclinação igual ou inferior a $2/5$ corresponde à dosagem de saturação. No exemplo apresentado na Figura 3.16 a dosagem de saturação é considerada a correspondente ao ponto Sp2.

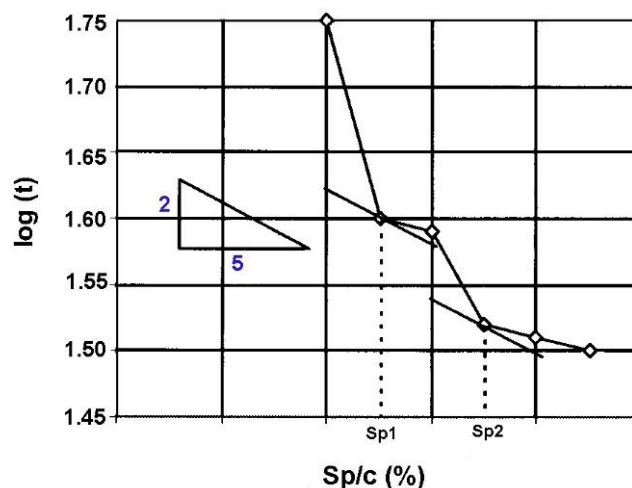


Figura 3.16 – Dosagem de saturação segundo o método proposto pela *AFREM* (Larrard, Bosc et al., 1997).

O tempo de escoamento (TE) pode ser considerado como uma função das características do equipamento de ensaio (tipo, geometria), do volume de material colocado no cone (V) e da natureza do fluido (composição material). Consequentemente, para o cone de *Marsh* com uma geometria fixa e um determinado volume V , o TE pode ser expresso pela Equação (3.4):

$$TE = f(V) \times \phi(\Delta) \quad (3.4)$$

onde f é a função de volume e ϕ é a função da natureza da pasta, onde Δ representa a razão w/c , o tipo de cimento e o tipo e dosagem de superplastificante. Quando apenas a dosagem de superplastificante (Sp/c) é variável, *Gomes* (2002) mostra que o uso do logaritmo do tempo de escoamento permite empregar um critério que depende apenas das características intrínsecas da pasta e não do volume utilizado para a realização do ensaio.

3) Ensaios reológicos

Os ensaios reológicos surgem como uma alternativa, mais precisa e abrangente, aos ensaios tradicionais de avaliação das propriedades da pasta no estado fresco, embora nem sempre aplicável dada a sofisticação dos equipamentos envolvidos. De salientar que os resultados apresentados neste trabalho relativamente à reologia das pastas inserem-se num estudo desenvolvido no âmbito do projecto BACPOR por *Santos et al.*.

3.2.2.3 Estudos em argamassas

Partindo dos resultados dos ensaios com as pastas e dos requisitos de desempenho definidos é possível fixar a razão w/c e a dosagem óptima de superplastificante para a pasta definida. Sendo assim, para estabelecer a composição da argamassa resta definir a razão volumétrica água/finos (V_w/V_p), a relação entre as duas areias (s_1/s_2) e o conteúdo de areia (V_s/V_m) (Quadro 3.3). No mesmo quadro apresenta-se ainda, para cada um dos parâmetros da composição, a forma com é definido e em alguns casos, atendendo às recomendações apresentadas no Quadro 3.1 e à experiência adquirida anteriormente, intervalos de valores considerados aconselháveis.

Quadro 3.3– Parâmetros definidores da composição do BAC.

Parâmetros da composição	w/c	V_w/V_p	Sp/p	V_s/V_m	s_1/s_2	V_a	$V_g/V_{g,lim}$
	<i>fixado</i> ^(a)	<i>variável</i>	<i>fixado</i> ^(a)	<i>variável</i>	<i>variável</i>	<i>fixado</i>	<i>variável</i>
m^3/m^3	(b)	(d) e 0.8-1.2	(c)	(d) e 0.4-0.5	(d)	(b)	(e) e 0.5 – 0.6

(a) Este valor encontra-se fixo inicialmente, embora numa fase final possa sofrer reajustes

(b) Tendo em conta os requisitos de resistência e durabilidade

(c) Tendo em conta os ensaios em pastas

(d) Tendo em conta os ensaios em argamassas

(e) Parâmetro definido nos ensaios em betões

A optimização da composição da argamassa que satisfaz os requisitos de desempenho e as características no estado fresco é realizada através de ensaios de espalhamento e fluidez, fazendo-se variar as proporções dos diferentes materiais constituintes da argamassa segundo o procedimento abaixo indicado. De acordo com o método de *Okamura et al.* a argamassa adequada para um BAC deve exibir um diâmetro de espalhamento de 250mm e um tempo de escoamento no funil de 10s. No entanto, tal como já foi discutido anteriormente uma argamassa com estas características conduz a um BAC de elevada viscosidade, contendo quantidades excessivas de finos e superplastificante e, por isso, com custos bastante elevados. Neste sentido, as recomendações europeias mais recentes apontam para um intervalo de aceitação para as propriedades frescas da argamassa de um BAC (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005; EFNARC, 2002). A argamassa optimizada deverá apresentar valores do diâmetro de espalhamento e do tempo de escoamento

que se encontrem dentro de uma área rectangular definida por um diâmetro de espalhamento mínimo ($Desp_{min}$), um diâmetro de espalhamento máximo ($Desp_{max}$), um tempo de escoamento no funil mínimo ($T_{funil_{min}}$) e um tempo de escoamento no funil máximo ($T_{funil_{max}}$). Baseado em algumas referências bibliográficas e na experiência adquirida por aplicação do método de *Okamura et al.* estabeleceu-se que o espalhamento médio da argamassa deveria estar compreendido entre 240 e 260mm, correspondendo ao $Desp_{min}$ e $Desp_{max}$ respectivamente, e o tempo de escoamento no funil entre 7 e 11s, correspondendo ao $T_{funil_{min}}$ e $T_{funil_{max}}$ respectivamente (Figura 3.17). No caso de composições que utilizem superplastificantes destinados a longos períodos de transporte, antes da colocação do betão, verifica-se um aumento do diâmetro de espalhamento ao longo do tempo, pelo que nesta fase bastará obter para o $Desp_{min}$ um valor de cerca de 210mm no final da amassadura. As dimensões dos equipamentos e descrição dos procedimentos dos ensaios de espalhamento e fluidez em argamassas, encontram-se descritos no Anexo D. Os procedimentos de amassaduras para as argamassas apresentam-se no Anexo B.

Procedimento de optimização da argamassa

Os valores iniciais dos parâmetros definidores da composição da argamassa devem ser fixados do seguinte modo:

- Fixar Sp/p atendendo à dosagem de saturação do superplastificante;
- Fixar w/c em função da resistência pretendida e dos requisitos de durabilidade;
- Fixar $V_s/V_m=0.5$ (valor correspondente ao limite superior do intervalo recomendado, que em princípio, conduz à composição mais económica);
- Fixar 100% Areia s_1 ($s_1/s=1.0$);
- Fixar V_w/V_p no intervalo de 0.8 a 0.9 β_p (o valor de β_p correspondente à composição de finos com que vai ser iniciado o estudo das argamassas).

O procedimento desenvolvido esquematiza-se na Figura 3.17 e consiste nas seguintes fases:

- a) Atribuir valores a w/c e V_w/V_p que conduzam a um tempo de escoamento no funil da ordem de 10s e caso isto não aconteça o procedimento a seguir será:

a.1) Para $t \gg 10s$

⇒ Aumentar V_w/V_p . Caso este valor já seja bastante elevado, reduzir a quantidade de areia na argamassa, isto é, a razão V_s/V_m .

a.2) Para $t < 10s$.

⇒ Reduzir V_w/V_p (com w/c fixo), o que conduz a um aumento de finos, essencialmente à custa de maior percentagem de adição ($> w_f/w_c$). O resultado conduzirá, com a generalidade das adições, a um aumento do tempo de escoamento e redução do diâmetro de espalhamento. A gama de variação de V_w/V_p e portanto de w_f/w_c deve ter em conta o comportamento das pastas para diferentes w_f/w_c observado na fase anterior;

ou

⇒ Pequena redução de w/c , o que conduz a uma redução de w_f/w_c sem alterar o volume de finos (maior percentagem de cimento). O resultado será um aumento do tempo de escoamento e redução do diâmetro de espalhamento.

- b) Optimizar a composição das areias s_1 e s_2 , variando a razão s_1/s de forma a se observar o maior diâmetro de espalhamento (geralmente correspondente à relação que apresenta o menor tempo de escoamento). No caso de se utilizar apenas uma areia esta fase não é necessária.

Caso, para a relação s_1/s seleccionada, o tempo de escoamento tenha descido demasiado e o diâmetro de espalhamento esteja ainda longe do mínimo recomendado, ou seja, T_{funil} inferior a 7.0s e $Desp$ inferior a 200mm, será necessário repetir o passo a) até alcançar um tempo de escoamento adequado, mas agora com a nova relação de areias.

- c) Se no final da fase anterior o diâmetro de espalhamento for ainda insuficiente, reduzir simultaneamente V_w/V_p e V_s/V_m de modo a aumentar w_f/w_c e manter a quantidade de cimento, o que conduz a um aumento do

diâmetro de espalhamento sem afectar significativamente o tempo de escoamento.

- d) Caso não se consiga na fase anterior alcançar um diâmetro de espalhamento suficiente, será necessário aumentar a dosagem de superplastificante.

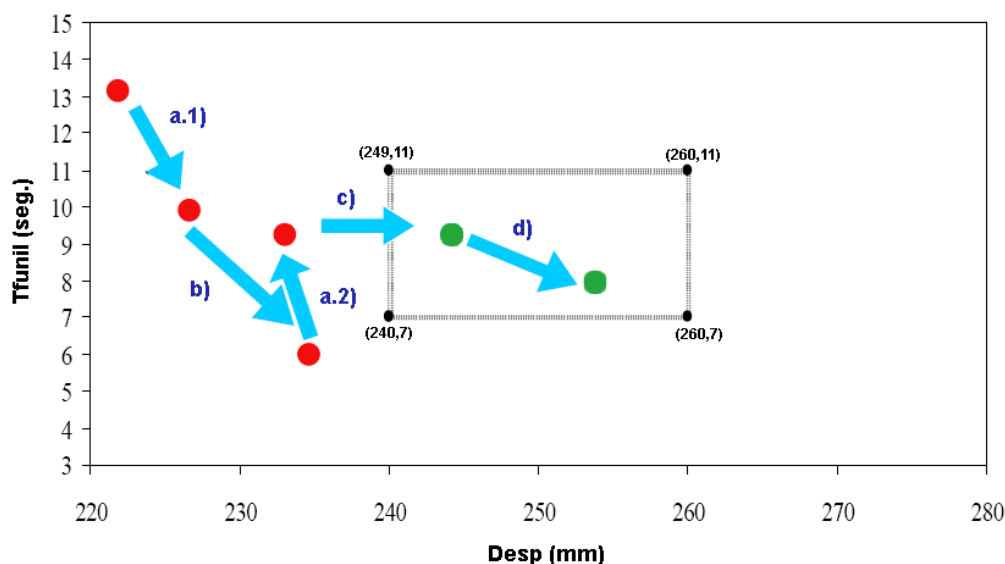


Figura 3.17 – Esquema ilustrativo das fases do procedimento de optimização da argamassa

3.2.2.4 Estudos em betões

Para terminar a definição da composição, resta definir o volume de agregado grosso (V_g). Mantendo as proporções da argamassa, otimizada na fase anterior, são ensaiadas diferentes composições de betão para ajustar a quantidade de agregado grosso (V_g) e comprovar a auto-compactabilidade no estado fresco. V_g representa o volume de agregado grosso equivalente a um volume aparente (V_{ap}) definido, podendo ser determinado através da Equação (3.5).

$$V_g = V_{ap} \times V_{g,lim} (1 - V_a) \quad (3.5)$$

Onde $V_{g,lim}$ representa o volume das partículas do agregado grosso, compactadas, que é possível empacotar num volume de $1m^3$, numericamente igual à razão entre o valor da baridade (compactada) e da massa volúmica. O volume de ar por unidade de volume (V_a) é definido em função da classe de exposição ambiental.

Para avaliar as propriedades do betão fresco deve-se realizar ensaios de espalhamento do betão, ensaios de fluidez utilizando o funil em V, e ensaios da caixa-U (Figura 3.18). As dimensões dos equipamentos e a descrição dos

procedimentos destes ensaios podem ser encontradas no Anexo D. As amassaduras foram realizadas na betoneira de eixo vertical de acordo com o procedimento apresentado no Anexo B. Toda a formulação inerente à determinação das quantidades dos diferentes constituintes da pasta, argamassa e betão encontra-se descrita no Anexo C.

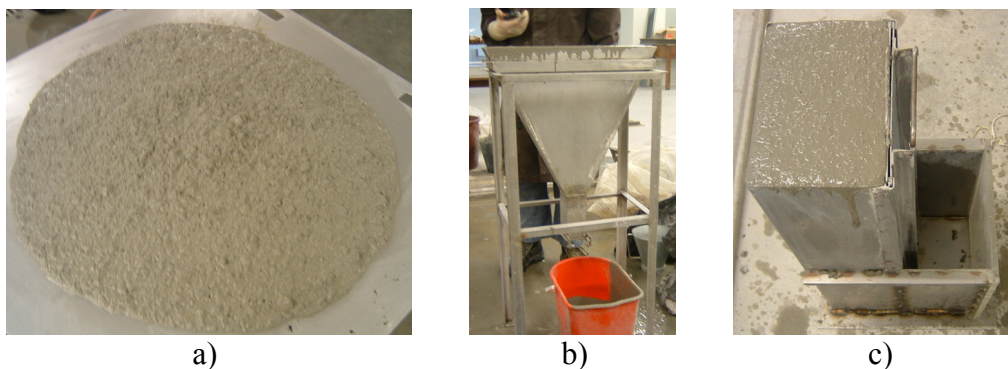


Figura 3.18 – a) Ensaio de espalhamento; b) Ensaio fluidez; c) Ensaio da caixa-U

Poderá haver necessidade de ajustar novamente a dosagem de superplastificante para que sejam atingidos os requisitos no ensaio de espalhamento e fluidez, dado que o efeito do superplastificante no betão é diferente do efeito na argamassa devido à menor eficiência da amassadura.

A última fase da metodologia proposta para definição de composições de betão auto-compactável, consiste na caracterização do betão endurecido, suas características mecânicas e de durabilidade, para verificar o cumprimento dos requisitos de desempenho.

3.2.3 Aplicação prática da metodologia à composição MAPREL-Nelas

Nos pontos que se seguem são apresentados os resultados das várias etapas da metodologia de concepção de composições de BAC, nomeadamente definição dos requisitos de desempenho e materiais, ensaios em pastas, ensaios em argamassas e ensaios no betão fresco e endurecido, para a concepção de uma composição destinada à pré-fabricação (composição MAPREL-Nelas)

3.2.3.1 Requisitos de desempenho e caracterização dos materiais

A composição MAPREL-Nelas destina-se à betonagem de vigas-caixão numa fábrica de pré-fabricação localizada na zona norte interior de Portugal, onde os Invernos são rigorosos e os Verões bastante quentes. Para a referida aplicação

pretendia-se um betão da classe de resistência C45/55 com uma tensão de rotura mínima em cubos de 45MPa, às 36 horas, de forma a permitir a aplicação do pré-esforço. De salientar que o troço de viga-caixão com condições de betonagem mais exigente é o da zona de ancoragem dos cabos de pré-esforço, onde o espaçamento entre as armaduras é bastante reduzido. Os materiais seleccionados para esta composição foram: cimento CEM I 52.5R; filer calcário (Micro100, da “Comital”); areia fina natural (módulo finura 1.77); areia britada granítica (módulo finura 3.85); brita granítica (módulo finura 3.85 e 19mm de dimensão máxima) e superplastificante Viscocrete 3000, da “Sika”, à base de carboxilatos modificados, com 18.5% de teor em sólidos. No Anexo A apresenta-se uma caracterização mais completa de cada um dos materiais utilizados na concepção da composição de BAC MAPREL-Nelas. O Quadro 3.4 resume o conjunto de requisitos de desempenho impostos, os materiais seleccionados e alguns dos parâmetros da composição definidos com base nessas exigências.

Quadro 3.4 – Caracterização dos requisitos de desempenho, materiais constituintes e alguns parâmetros da composição de BAC da MAPREL-Nelas

Composição MAPREL-Nelas		
Requisitos de desempenho	Materiais Constituintes	
<ul style="list-style-type: none"> • C45/55; • $R_{c,m,cubos} > 45\text{MPa}$, às 36 horas; • Estrutura esbelta e com grande densidade de armadura na zona de ancoragens; • Temperaturas muito baixas no Inverno e muito altas no Verão. 	Agregados	Areia fina natural
		Areia britada granítica
		Brita granítica ($d_{máx} = 19.1\text{mm}$)
	Cimento	CEM I 52.5 R
	Adições	Filer calcário (<i>Micro 100</i>)
	Adjuvantes	Superplastificante (V3000)
	Parâmetros da Composição	
	<ul style="list-style-type: none"> • $w/c \leq 0.45$ • $V_a = 0.02\text{m}^3/\text{m}^3$ 	

Atendendo ao tipo de aplicação a que se destina esta composição, betonagem de vigas-caixão, foram estabelecidos os valores aconselháveis para cada um dos ensaios de avaliação das propriedades do estado fresco (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 – Valores aconselháveis para os ensaios de avaliação das propriedades do betão fresco para a composição MAPREL-Nelas

Ensaio para o betão fresco	Grandezas medidas	Intervalo de aceitação
Ensaio de espalhamento	Desp	[600; 700]mm
Ensaio de fluidez	Tfunil	[8; 12]s
Ensaio da caixa-U	H	> 300mm

3.2.3.2 Estudos em pastas

Nesta fase foram realizados ensaios reológicos com o intuito de avaliar o comportamento da pasta para diferentes percentagens de substituição de cimento por filer calcário. Definindo uma razão $w/(c+f)$ de 0.35 e utilizando uma dosagem de superplastificante de $0.2\% Sp_{sólido}/(c+f)$, foram estudadas cinco composições com percentagens de substituição que variaram dos 0% aos 50%. Na Figura 3.19a apresentam-se os viscogramas das pastas com as diferentes percentagens de substituição de cimento por filer calcário, mostrando um decréscimo da viscosidade das pastas com o aumento da quantidade de filer. Na Figura 3.19b representa-se a viscosidade das composições para taxas de deformação de 16 e 108Hz, verificando-se que a partir de 40% de substituição de cimento por filer calcário a viscosidade da pasta não sofre alterações significativas.

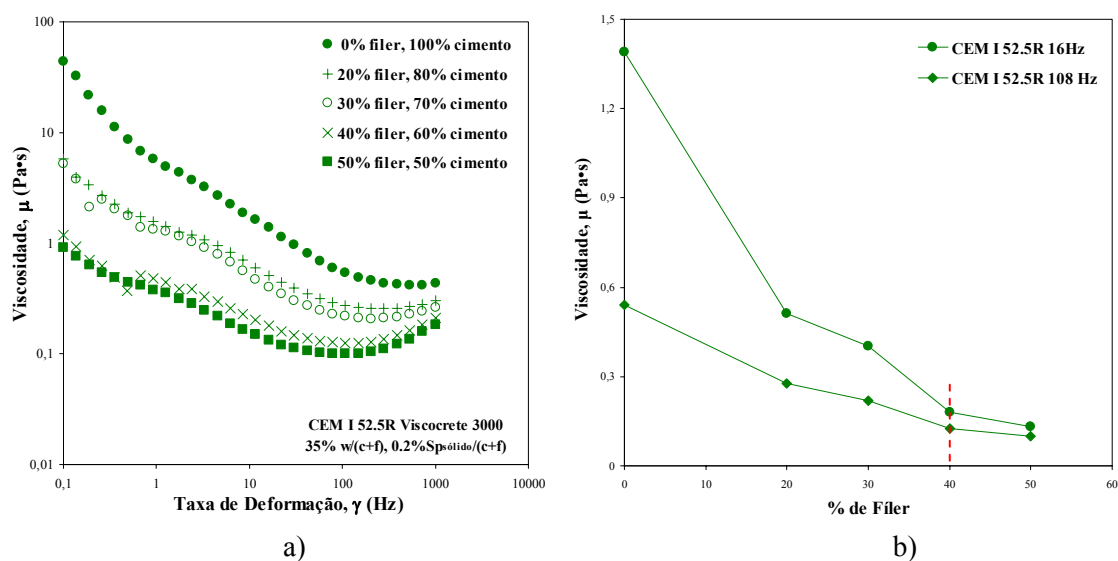


Figura 3.19 – Medição da viscosidade em pastas com diferentes percentagens de filer calcário: a) taxas de deformação dos 0.1-1000Hz; b) taxas de deformação de 16 e 108Hz (Santos, Lopes *et al.*, 2004b)

Estabelecendo para razão w/c o valor de 0.45 e atendendo aos resultados dos estudos reológicos e às exigências em termos de resistência, definiu-se como percentagem de substituição para iniciar os estudos em argamassas $w_f/w_c=25\%$, que corresponde aproximadamente a $w_f/(w_c + w_f)=20\%$.

Para as percentagens de 0%, 20%, 30% e 40% de substituição foi estudado o efeito do superplastificante nas pastas, analisando-se o seu comportamento para diferentes dosagens de $Sp_{sólido}/(c+f)$. Nas figuras seguintes apresentam-se os viscogramas das pastas sem filer (Figura 3.20a) e das pastas com uma percentagem de substituição de 40% (Figura 3.20b), para diferentes dosagens de superplastificantes. Observando os viscogramas conclui-se que a substituição de filer por cimento reduz não só a viscosidade das pastas como também a dosagem de saturação do superplastificante, que no caso das pastas só com cimento é cerca de $0.3\%Sp_{sólido}/p$ e para as pastas com 40% de substituição está entre 0.20 e $0.25\%Sp_{sólido}/p$. Em qualquer um dos casos verifica-se que o aumento da dosagem de superplastificante reduz a viscosidade das pastas.

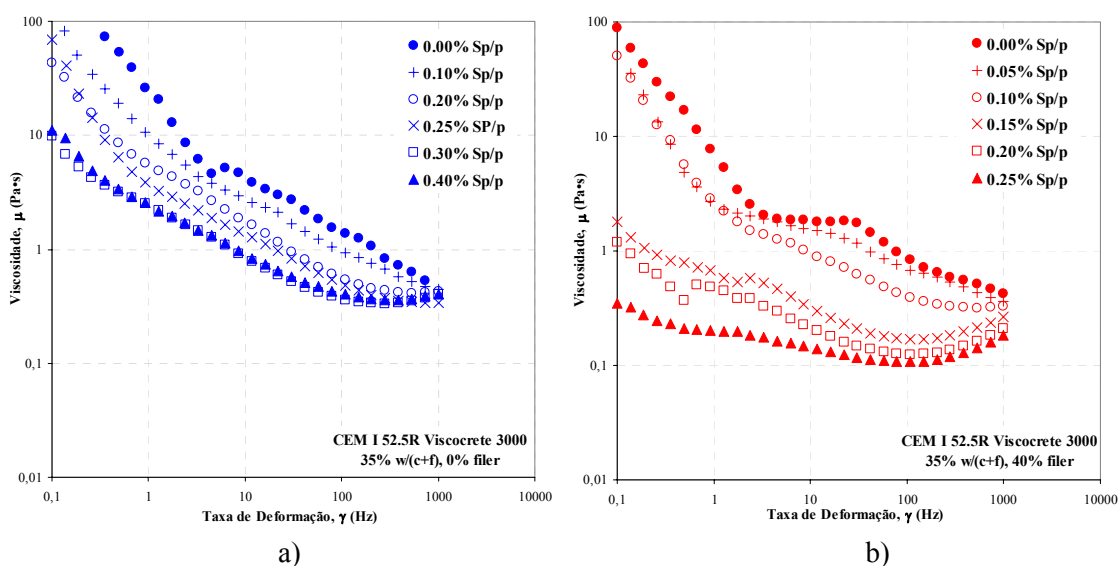


Figura 3.20 – Medição da viscosidade em pastas com diferentes dosagens de Sp : a) para 0% de filer calcário; b) para 40% de filer calcário (Santos, Lopes *et al.*, 2004b)

Para aferir a relação entre a dosagem de saturação do superplastificante e a percentagem de filer, na Figura 3.21 apresenta-se o gráfico da variação dos valores da viscosidade para uma taxa de deformação de 16Hz, em função da dosagem de superplastificante, para diferentes percentagens de filer. Analisando os resultados verifica-se que a dosagem de saturação para pastas com 20%, 30% e 40% de

substituição é sensivelmente a mesma e que para pasta sem filler essa dosagem aumenta para valores próximos de $0.3\% \text{Sp}_{\text{solido}}/\text{p}$.

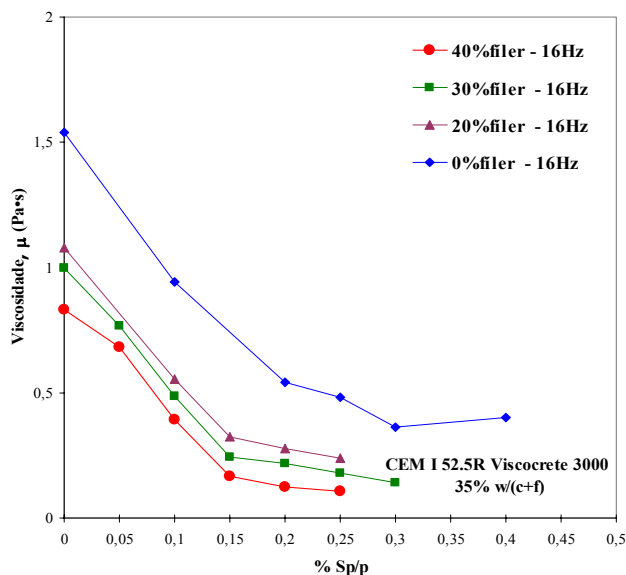


Figura 3.21 – Viscosidade das pastas para uma taxa de deformação de 16Hz, com 0%, 20%, 30% e 40% de filler para diferentes dosagens de superplastificante (Santos, Lopes *et al.*, 2004b)

Para a percentagem de filler definida ($w_f/w_c = 25\%$), foram estudadas composições de cimento CEM I 52.5R e filler calcário (Micro 100) com diferentes valores de V_w/V_p e determinaram-se os respectivos valores do espalhamento relativo, G_p . Observando a Figura 3.22 verifica-se que fazendo variar V_w/V_p entre 1.400 e 1.800 obtiveram-se valores para a área de espalhamento relativa entre 1.0 e 4.0, existindo uma correlação linear entre V_w/V_p e G_p . Assim, utilizando uma percentagem de 25% de filler, obteve-se para a razão de água retida pelos finos o valor $\beta_p = 1.243$ e para o factor de deformação $E_p = 0.150$.

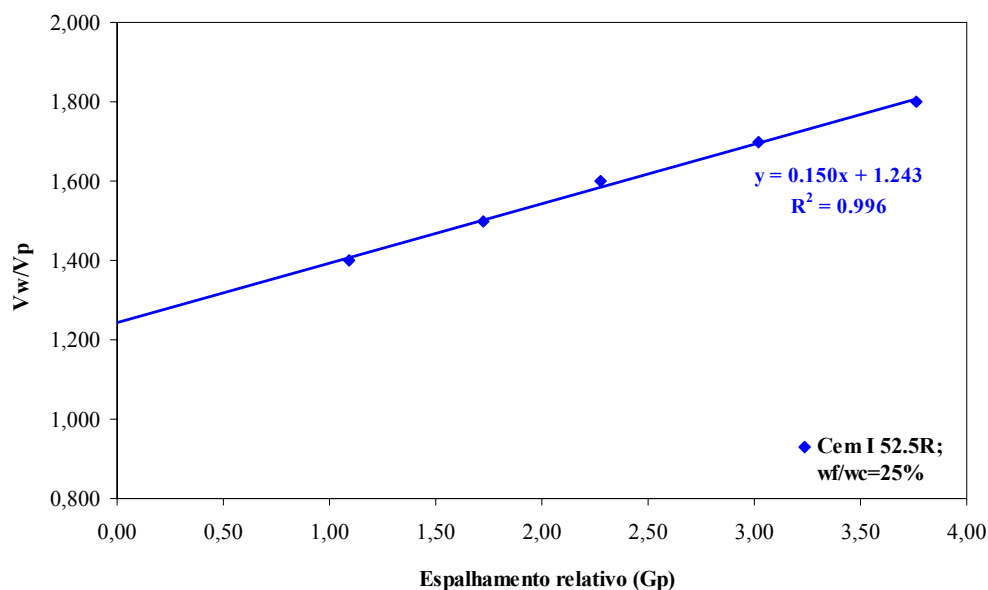


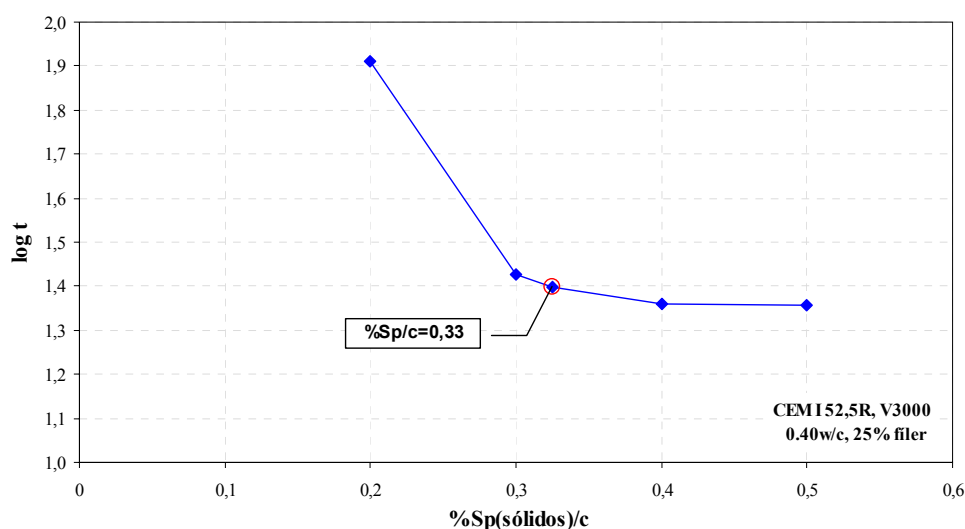
Figura 3.22 – Recta de ajuste aos resultados do ensaio de espalhamento da pasta, composição de CEM I 52.5R e filer calcário

Posteriormente, para a composição com uma percentagem de substituição de 25% de filer por cimento ($w_f/w_c = 25\%$) realizou-se um conjunto de pastas para determinar a dosagem adequada de superplastificante, utilizando, para isso, o ensaio do cone de *Marsh*. O valor da razão w/c utilizada neste estudo foi de 0.40, diferente dos 0.45 fixado para a argamassa inicial da fase seguinte. Segundo o estudo realizado por *Santos et al.* (2004b), a alteração no teor de água não afecta o valor da dosagem de saturação e o facto de se utilizar uma razão w/c mais baixa permite obter pastas mais viscosas possibilitando uma medição do tempo de escoamento mais precisa. No Quadro 3.6 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados em pastas com uma $w/c=0.40$ e para dosagens de superplastificante que variam de 0.2 a 0.5% $Sp_{sólido}/c$. Nesse quadro para além do valor do logaritmo do tempo médio de escoamento de cada pasta é apresentado o valor do ângulo formado pelo segmento de recta que une dois pontos, correspondentes a duas medições, com a horizontal (θ_{ij}). Segundo o método proposto pela *AFREM* (Larrard, Bosc et al., 1997), quando esse ângulo for igual ou menor que $2/5$ (21.8°), diz-se que foi atingida a dosagem de saturação, o que no caso das composições em estudo ocorre aproximadamente para uma dosagem de $Sp_{sólidos}/c=0.325\%$ correspondente a $Sp_{sólidos}/p=0.260\%$.

Quadro 3.6 – Resultados obtidos no ensaio do cone de *Marsh* da composição CEM I 52.5R e filer calcário

w/c	w _f /w _c	Sp _{sol} /c (%)	Sp _{sol} /p (%)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t _{médio} (s)	log (t)	θ _{ij} (graus)
0.40	0.25	0.200	0.160	64.43	83.97	96.00	81.47	1.91	-
0.40	0.25	0.300	0.240	25.12	27.94	27.94	26.80	1.43	78.3
0.40	0.25	0.325	0.260	24.25	25.85	25.10	25.07	1.40	49.3
0.40	0.25	0.400	0.320	21.19	23.62	23.78	22.86	1.36	28.0
0.40	0.25	0.500	0.400	21.38	23.09	23.56	22.68	1.36	2.0

Na Figura 3.23 é possível observar a evolução dos resultados do ensaio do cone de *Marsh*, verificando-se que a partir da dosagem Sp_{sólidos}/c=0.325% os segmentos de recta são praticamente horizontais. Este resultado permite confirmar a dosagem de saturação obtida nos ensaios reológicos.


 Figura 3.23 – Resultados do ensaio do cone de *Marsh*

3.2.3.3 Estudos em argamassas

Nas etapas anteriores, através dos requisitos de desempenho e dos ensaios com as pastas fixou-se a razão água/cimento (w/c) em 0.45 e uma razão filer/cimento (w_f/w_c) de 0.25. De forma a tirar o maior partido do superplastificante, foi utilizada a dosagem correspondente à de saturação, para a composição de finos seleccionada como ponto de partida para os estudos em argamassas, Sp/p de 1.78% equivalente a Sp(sólidos)/p de 0.33%. Para V_w/V_p tomou-se 0.8β_p (1.000), iniciando-se o

procedimento de optimização da argamassa apenas com uma areia e para uma razão de V_s/V_m de 0.5. No Quadro 3.7 apresentam-se os valores dos parâmetros definidores da composição da argamassa e os respectivos resultados dos ensaios no estado fresco, nas várias fases do procedimento. Os mesmos resultados podem ser observados na representação gráfica da Figura 3.24. O cálculo das quantidades dos diversos constituintes foi efectuado recorrendo ao conjunto de expressões apresentadas no Anexo C.

Quadro 3.7 – Resultados obtidos nos ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas

nº	w/c	Sp/p (%)	V_w/V_p	V_s/V_m	w_f/w_c	s_1/s	Início dos ensaios	d (mm)	t (seg)
1	0.45	1.780	1.100	0.500	0.239	1.000	~10 min.	179.3	8.5
2	0.45	1.780	1.050	0.500	0.292	1.000	~10 min.	171.3	9.8
3	0.45	1.780	1.050	0.500	0.292	0.600	~10 min.	193.3	5.4
4	0.45	1.780	1.050	0.500	0.292	0.550	~10 min.	193.5	5.3
5	0.45	1.780	1.050	0.500	0.292	0.500	~10 min.	216.0	4.2
6	0.45	1.780	1.050	0.500	0.292	0.450	~10 min.	205.0	5.1
7	0.45	1.780	1.050	0.500	0.292	0.400	~10 min.	211.5	4.4
8	0.45	1.780	1.000	0.500	0.350	0.500	~10 min.	214.5	4.8
9	0.42	1.780	1.000	0.500	0.269	0.500	~10 min.	188.3	7.1
10	0.41	1.780	1.000	0.500	0.242	0.500	~10 min.	184.5	7.5
11	0.41	1.780	0.910	0.475	0.351	0.500	~10 min.	217.3	6.9
12	0.41	1.780	0.840	0.452	0.452	0.500	~10 min.	202.8	8.4
12'	0.41	1.780	0.840	0.452	0.452	0.500	~20 min.	249.8	7.5
0	0.46	1.810	1.066	0.513	0.292	0.588	~10 min.	246.0	4.4

Após se ter conseguido um tempo próximo de 10s (argamassas nºs 1 e 2), foram ensaiadas diversas relações de s_1/s_2 para encontrar aquela que conferia maior deformabilidade à argamassa (argamassas nºs 2 a 7). A argamassa que exibiu maior diâmetro de espalhamento foi a argamassa nº 5, com uma relação de areias de $s_1/s_2=0.5$, correspondendo também aquela que apresentou menor tempo de escoamento, 4.2s. Dado que o tempo de escoamento desceu bastante foi necessário baixar a razão w/c, por forma a que fosse superior a 7s. (argamassas nºs 8 a 10).

Em seguida foi necessário contrabalançar V_w/V_p e V_s/V_m de forma a obter um diâmetro de espalhamento suficiente sem prejudicar demasiado o tempo de escoamento (argamassas nºs 9 a 12). Um aumento de V_w/V_p conduz a um aumento do diâmetro de espalhamento acompanhado de uma redução do tempo de escoamento. Uma redução de V_s/V_m corresponde a um aumento do conteúdo em pasta, resultando num aumento da deformabilidade da argamassa. Em termos económicos interessa aumentar ambos V_w/V_p e V_s/V_m , uma vez que implica uma redução da quantidade de finos e do volume de pasta, respectivamente.

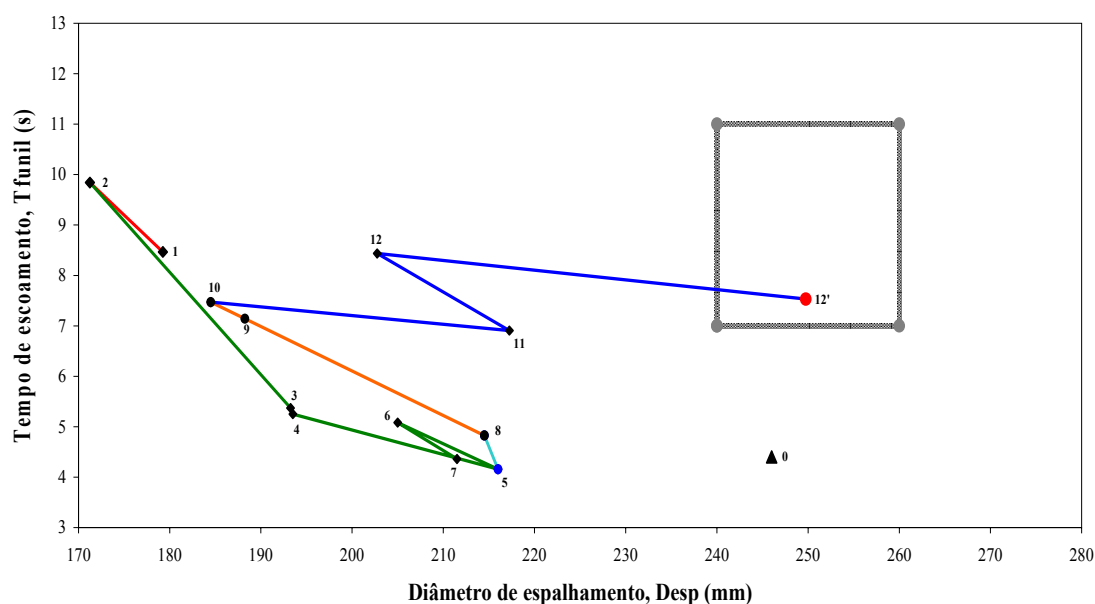


Figura 3.24 – Representação gráfica dos resultados obtidos com as argamassas e a zona considerada adequada para a argamassa de um BAC

Do conjunto de composições ensaiadas considerou-se como mais adequada a argamassa nº 12. Apesar de no final da amassadura esta mistura exibir um diâmetro de espalhamento de apenas 203mm, verificou-se que após 20 minutos esta composição já apresentava um espalhamento de 250mm e um tempo de escoamento de 7.5s (argamassa nº 12').

A última linha do Quadro 3.7 (argamassa nº0) diz respeito à composição da argamassa, correspondente à composição de betão resultante de um estudo iterativo realizado ao nível do betão, com estes mesmos materiais. A argamassa nº 0, possui uma viscosidade bastante inferior ao limite inferior do intervalo recomendado, embora a deformabilidade seja adequada. A composição 12 foi conseguida com $V_w/V_p=0.84$, $V_s/V_m=0.45$, $w/c=0.41$ e $s_1/s=0.5$, enquanto que à composição nº0 corresponde $V_w/V_p=1.07$, $V_s/V_m=0.51$, $w/c=0.46$ e $s_1/s=0.6$.

3.2.3.4 Estudos em betões

Para finalizar a definição da composição resta definir o volume de agregado grosso (V_g) a utilizar e verificar a sua auto-compactabilidade. Utilizando a composição da argamassa otimizada na fase anterior foram ensaiadas duas composições, a primeira para $V_{ap}=0.50m^3$ e a segunda com $V_{ap}=0.55m^3$, apresentadas nos quadros 3.8 e 3.9, respectivamente.

Quadro 3.8 – Parâmetros, quantidades e caracterização do estado fresco da composição A

Parâmetros da composição A			Caracterização em laboratório da composição A
$V_{ap}(\text{m}^3)$	0.500		Resultados no Estado Fresco: <u>Ensaio espalhamento:</u> Desp=582mm e T50=3.16seg. (aos 15 minutos) Desp=632mm e T50=2.62seg. (aos 35 minutos) <u>Ensaio fluidez:</u> Tfunil=8.5seg. (aos 20 minutos) <u>Ensaio caixa-U:</u> H=330mm (aos 30 minutos)
V_s/V_m	0.450		
V_w/V_p	0.840		
s_1/s	0.500		
w_f/w_c	0.450		
Quantidades na composição A			
agregado grosso	kg/m ³	727	
areia 1		393	
areia 2		393	
agregado fino		786	
cimento		421	
adição		190	
total de finos		611	
água^{a)}		172	
superplastificante		10.87	
$w/c^{b)}$ = 0.41	$w/p^{b)}$ = 0.28		
Sp/c = 2.58%	Sp/p = 1.78%		

^{a)} Na quantidade da água não está contabilizada a água de absorção dos agregados

^{b)} No cálculo desta relação, ao valor da água é adicionada a quantidade de água do superplastificante

Quadro 3.9 – Parâmetros, quantidades e caracterização do estado fresco da composição B

Parâmetros da composição B			Caracterização em laboratório da composição B
$V_{ap} \text{ (m}^3\text{)}$	0.550		Resultados no estado fresco: <u>Ensaio espalhamento:</u> Desp=573mm e T50=2.90seg. (aos 10 minutos) Desp=638mm (aos 55 minutos) <u>Ensaio fluidez:</u> Tfunil=8.4seg. (aos 15 minutos) <u>Ensaio caixa-U:</u> H=330mm (aos 20 minutos) Resultados no estado endurecido: fcm,cubos(2 dias) = 57.3MPa fck,cilindros ^{c)} (28 dias) = 62.0MPa Ecm (28 dias) = 39.2GPa
V_s/V_m	0.450		
V_w/V_p	0.840		
s_1/s	0.500		
w_f/w_c	0.450		
Quantidades na composição B			
agregado grosso	kg/m ³	800	
areia 1		376	
areia 2		376	
agregado fino		753	
cimento		404	
adição		182	
total de finos		586	
água^{a)}		165	
superplastificante		10.43	
$w/c^{b)}$ = 0.41	$w/p^{b)}$ = 0.28		
Sp/c = 2.58%	Sp/p = 1.78%		

a) Na quantidade da água não está contabilizada a água de absorção dos agregados

b) No cálculo desta relação, ao valor da água é adicionada a quantidade de água do superplastificante

c) f_{ck} definido segundo o critério 1 da NP EN 206-1(2005) $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$

Atendendo aos resultados apresentados considerou-se como mais favorável a composição B, uma vez que, sem prejudicar o comportamento do betão enquanto fresco, contém uma quantidade maior de agregado grosso. A utilização de maior volume de agregado grosso determina um menor volume de finos e de agregados finos, o que representa uma redução no custo da composição. No Quadro 3.9 são ainda apresentados alguns resultados da caracterização da composição B no estado endurecido, podendo-se constatar que são cumpridos os requisitos relativamente à resistência às 36 horas e aos 28 dias de idade. Exigia-se um betão C45/55 e uma resistência em cubos às 36 horas superior a 45MPa, tendo-se obtido às 48 horas 57.3MPa.

O quadro seguinte, Quadro 3.10, diz respeito à composição de betão resultante de um estudo iterativo realizado ao nível do betão, com os mesmos materiais que foram utilizados neste estudo e cuja correspondente argamassa foi apresentada no Quadro 3.7 (argamassa nº0). Esta composição, composição O–MAPREL–Nelas é apresentada apenas a título comparativo, uma vez que se tratou de uma composição que foi testada em escala real com um comportamento bastante satisfatório.

Quadro 3.10 – Parâmetros, quantidades e caracterização do estado fresco da composição O

Parâmetros da composição O			Caracterização em laboratório da composição O
$V_{ap} \text{ (m}^3\text{)}$	0.490		Resultados no estado fresco: <u>Ensaio espalhamento:</u> Desp=652mm (aos 25 minutos) Desp=645mm e T50=3.0seg. (aos 65minutos) <u>Ensaio fluidez:</u> Tfunil=6.6seg. (aos 30 minutos) <u>Ensaio caixa-U:</u> H=340mm (aos 40 minutos) Resultados no estado endurecido: fcm,cubos(2 dias) = 47.6MPa fck,cilindros ^{c)} (28 dias) = 52.5Mpa Ecm (28 dias) = 39.2Gpa
V_s/V_m	0.510		
V_w/V_p	1.066		
s_1/s	0.590		
w_f/w_c	0.290		
Quantidades na composição O			
agregado grosso	kg/m ³	710	
areia 1		539	
areia 2		378	
agregado fino		917	
cimento		383	
adição		115	
total de finos		498	
água^{a)}		169	
superplastificante		9.97	
$w/c^{b)}$ = 0.44	$w/p^{b)}$ = 0.34		
Sp/c = 2.60%	Sp/p = 2.00%		

^{a)} Na quantidade da água não está contabilizada a água de absorção dos agregados

^{b)} No cálculo desta relação, ao valor da água é adicionada a quantidade de água do superplastificante

^{c)} f_{ck} definido segundo o critério 1 da NP EN 206-1(2005) $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$

Se compararmos os valores dos parâmetros destas composições com os apresentados nas recomendações verifica-se que a composição B cai sempre dentro do intervalo recomendado, (Figura 3.25) (Figura 3.26). Nestas figuras para além das composições A e B representou-se também a composição final O resultante do estudo iterativo. Observando a Figura 3.26a constata-se que na composição B foi corrigida a deficiência em termos de agregado grosso que existia na composição O.

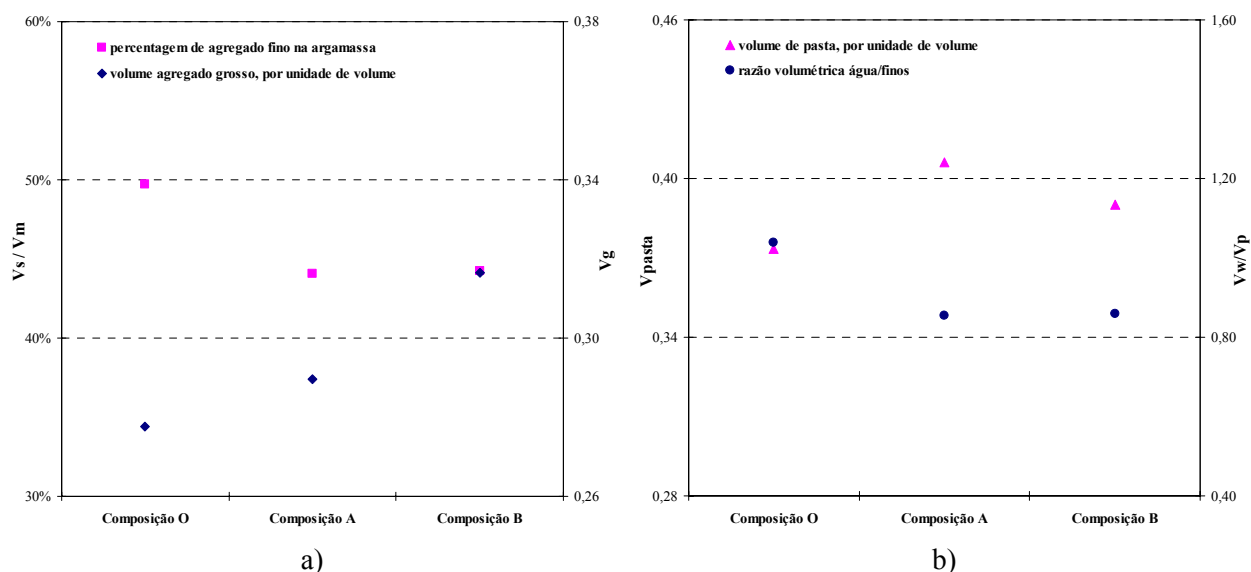


Figura 3.25 – Composições O, A e B: a) razão volumétrica areia/argamassa e volume de grossos; b) volume de pasta e razão volumétrica água /finos

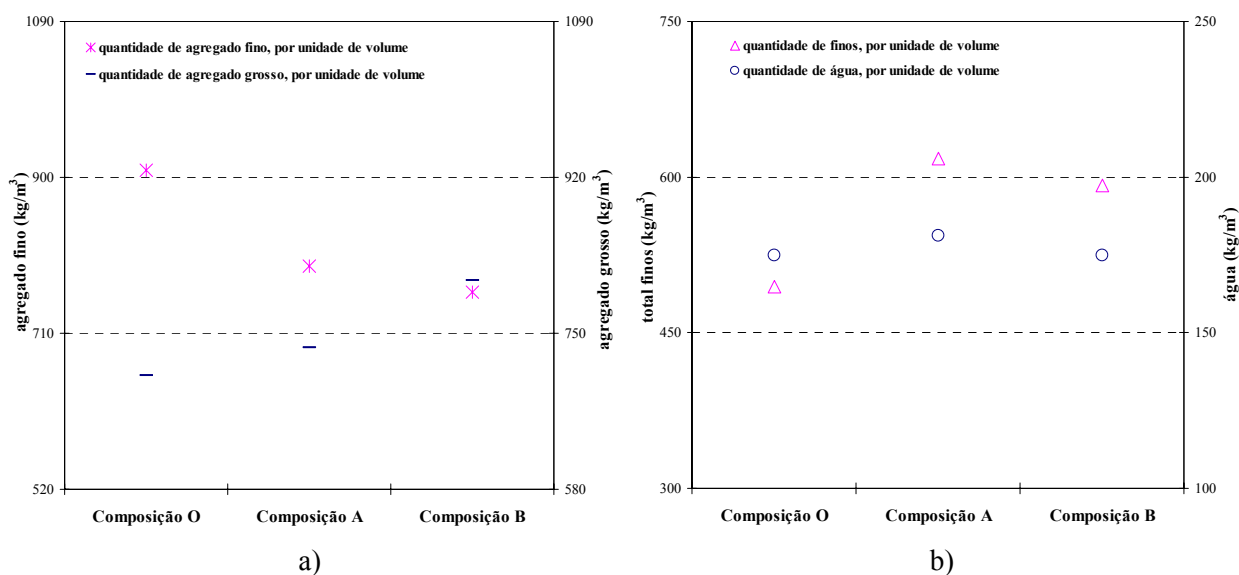


Figura 3.26 – Composições O, A e B: a) quantidades de agregado fino e grosso, por unidade de volume; b) quantidades de finos e água, por unidade de volume

3.2.4 Discussão e apreciação da metodologia

A metodologia apresentada foi aplicada a diversas composições de BAC, tendo em vista aplicações tanto na indústria da pré-fabricação como na indústria do betão-pronto, e utilizando um conjunto alargado de materiais disponíveis no mercado. Este procedimento baseou-se na metodologia apresentada por *Okamura et al.* e distingue-se desta por se fazerem variar as proporções dos diferentes materiais constituintes, no

sentido de otimizar a composição e atender, simultaneamente, às exigências de desempenho. Trata-se portanto de um método baseado num procedimento de tentativa-erro, mas de uma forma guiada, permitindo na generalidade dos casos chegar rapidamente a uma composição de BAC que se encontre dentro dos intervalos definidos para os ensaios de trabalhabilidade.

O facto de não se estabelecer um único ponto óptimo para as propriedades frescas da argamassa, tal como sucede no método de *Okamura et al.*, mas uma área dentro da qual se considera que a argamassa possui as propriedades adequadas, conduz a composições mais económicas. A definição de um único diâmetro de espalhamento e tempo no funil para a globalidade dos betões auto-compactáveis exige que se estabeleçam valores pelo lado da segurança, o que geralmente conduz a composições com maiores volumes de pasta.

O método apresentado não conduz a uma solução única, dependendo dos parâmetros fixados inicialmente para o estudo em argamassas, a solução final poderá ser diferente, mesmo encontrando-se dentro dos intervalos de aceitação.

Uma das limitações desta metodologia reside na forma como é determinada a relação entre as areias, que no caso de composições com mais do que uma areia, esta relação é definida através de ensaios em argamassas. O facto da relação de areias ser definida sem que seja considerado o conjunto de agregados utilizados na composição, isto é, areias e brita, poderá em alguns casos não conduzir à relação ideal. Refira-se ainda que, após a aplicação da metodologia para o dimensionamento de várias composições, verificou-se que esporadicamente durante os ensaios em argamassas foi necessário baixar a razão água/cimento, razão definida atendendo aos requisitos de desempenho da composição, para que fosse possível encontrar um BAC dentro dos intervalos de aceitação.

A metodologia apresentada baseou-se em procedimentos e equipamentos simples que facilmente podem ser implementados na indústria do betão. No estudo das pastas, paralelamente aos ensaios de espalhamento e fluidez foi realizado um conjunto de ensaios reológicos que permitiram por um lado, comparar resultados e por outro lado, conhecer o comportamento das pastas para uma gama alargada de taxas de deformação. O estudo reológico constituirá no futuro uma ferramenta fundamental no dimensionamento de composições de betão.

3.3 DIMENSIONAMENTO EXPERIMENTAL APOIADO NA ESTATÍSTICA

Após o desenvolvimento de uma metodologia essencialmente empírica, baseada em experiências de tentativa-erro, pretendeu-se adoptar uma abordagem mais científica na concepção de composições de BAC. Ao longo desta secção será descrita uma metodologia que permite modelar os efeitos dos diferentes parâmetros da composição nas propriedades frescas e endurecidas do betão. Os modelos numéricos são estabelecidos a partir de um conjunto de experiências realizadas em laboratório e com o auxílio de algumas ferramentas estatísticas. Assim, definidos os requisitos de desempenho do betão e estabelecidos os modelos numéricos para o conjunto de materiais seleccionados, facilmente se determina uma composição de BAC que cumpra os requisitos exigidos. O organigrama que a seguir se apresenta sintetiza todo o procedimento de definição dos modelos numéricos (Figura 3.27).

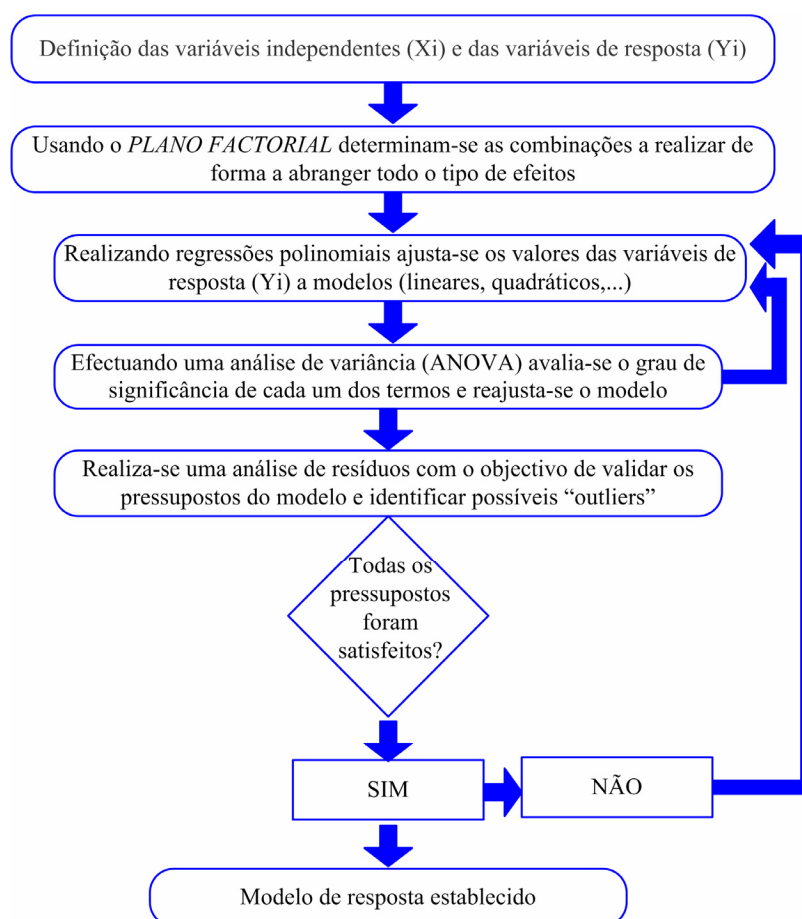


Figura 3.27 – Procedimento para definição de modelos de resposta dos parâmetros de uma composição (Nunes, Figueiras *et al.*, 2006)

Os materiais seleccionados para aplicação desta metodologia foram: cimento CEM I 52.5R; filler calcário (Micro100, da “Comital”); areia fina natural (módulo finura 2.52); areia grossa natural (módulo finura 3.27); brita calcária (módulo finura 6.08 e 9.5 mm de dimensão máxima) e superplastificante Viscocrete 3000, da “Sika”, à base de carboxilatos modificados, com 18.5% de teor em sólidos. No Anexo A apresenta-se uma caracterização mais completa de cada um dos materiais utilizados na concepção desta composição, composição Rio Maior.

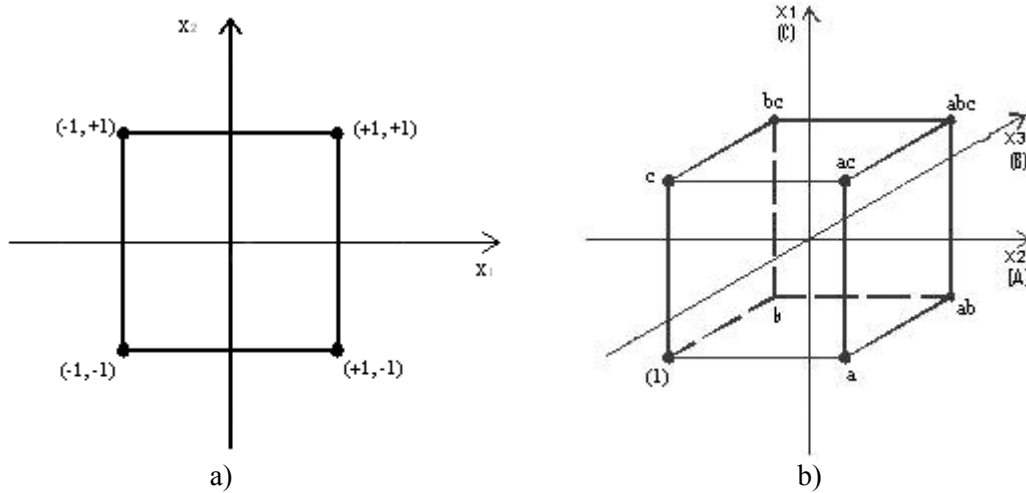
3.3.1 Programa experimental

3.3.1.1 Estratégia de experimentação

A auto-compactabilidade no betão fresco pode ser caracterizada essencialmente pelos seguintes requisitos funcionais: capacidade de enchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos. Estes requisitos são afectados pelas características físicas e químicas dos materiais e as suas proporções relativas na composição. Para alcançar um balanço adequado entre os diferentes requisitos, nos estados fresco e endurecido, é necessário considerar o efeito de um número elevado de variáveis, o que torna o dimensionamento do BAC um processo complicado.

O plano factorial é frequentemente utilizado em experiências que envolvem muitos parâmetros (variáveis) onde é necessário estudar o seu efeito conjunto na resposta. Um caso particular do plano factorial é aquele em que existem k parâmetros, cada um com apenas 2 níveis. Estes níveis podem ser quantitativos, tal como 2 valores da temperatura, pressão ou tempo, ou podem ser qualitativos, tal como duas máquinas, dois operadores, o nível “alto” e “baixo” de um parâmetro, ou a presença ou a ausência do parâmetro. O completo desenvolvimento deste plano requer $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observações (experiências) e é designado por plano factorial 2^k (Montgomery, 1996).

O plano factorial 2^k é particularmente vantajoso num estado inicial do trabalho experimental, onde existem muitos parâmetros a ser investigados. Determina-se o número mínimo de experiências a realizar com os k parâmetros de forma a tirar conclusões sobre o efeito isolado de cada um dos parâmetros e o efeito de interacção entre parâmetros. A forma mais simples do plano factorial 2^k é designada por 2^2 , que consiste em dois parâmetros, cada um com dois níveis, o nível “alto” e “baixo”, codificado no nível +1 e nível -1 respectivamente (Figura 3.28a).


 Figura 3.28 – a) Plano factorial para $k=2$; b) Plano factorial para $k=3$ (Montgomery, 1996)

O plano factorial pode facilmente ser estendido a mais do que dois factores, por exemplo considerando $k=3$ parâmetros com 2 níveis cada, o plano factorial de 2^3 apresenta 8 combinações possíveis, que geometricamente são representadas como os cantos de um cubo, ver Figura 3.28b. Este tipo de plano permite assim estimar 3 efeitos isolados (A, B e C) junto com 3 interações de 2 parâmetros (AB, AC e BC) e 1 interação de 3 parâmetros (ABC). O efeito de um factor é definido como a mudança na resposta provocada pela mudança no nível do parâmetro. Assim, o efeito do parâmetro A pode ser estimado pela diferença entre a média das observações quando o parâmetro A se encontra no nível alto e a média das observações quando o parâmetro A se encontra no nível baixo, ver Equação (3.6).

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (3.6)$$

De forma semelhante determinam-se os efeitos de B e C, ver equações (3.7) e (3.8), respectivamente.

$$B = \bar{y}_{B+} - \bar{y}_{B-} = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (3.7)$$

$$C = \bar{y}_{C+} - \bar{y}_{C-} = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (3.8)$$

A interação entre os parâmetros A e B, efeito AB, pode ser determinada pela diferença entre a média do efeito A nos dois níveis do parâmetro B. Metade da diferença entre a média do efeito de A quando o parâmetro B se encontra num nível

alto e a média do efeito de A quando o parâmetro B se encontra num nível baixo é designada pela interacção AB, ver equações (3.9) e (3.10).

$$AB = \frac{1}{2n} \left[\frac{(abc - bc) + (ab - b)}{2n} - \frac{(ac - c) + (a - (1))}{2n} \right] \quad (3.9)$$

$$AB = \frac{1}{4n} [abc - bc + ab - b - ac + a - a + (1)] \quad (3.10)$$

A equação anterior pode ser reescrita de uma outra forma, ver Equação (3.11):

$$AB = \frac{abc + ab + c + (1)}{4n} - \frac{bc + b + ac + a}{4n} \quad (3.11)$$

Escrita desta forma, facilmente se percebe que a interacção AB representa a média das observações de dois planos diagonais do cubo. Usando uma lógica similar pode-se determinar as interacções AC e BC, tal como se apresenta nas equações (3.12) e (3.13), respectivamente.

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (3.12)$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (3.13)$$

A interacção ABC é definida como a média da diferença da interacção AB para os dois diferentes níveis do parâmetro C, ver Equação (3.14). Tal como no caso das interacções anteriores, podemos pensar na interacção ABC como a diferença de duas médias definidas pelos vértices de dois tetraedros que compreendem o cubo.

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (3.14)$$

Relativamente a uma composição de BAC, esta pode ser estabelecida através dos seguintes parâmetros (variáveis): razão volumétrica água/finos (V_w/V_p), razão filer/cimento (w_f/w_c), razão superplastificante/finos (Sp/p), razão volumétrica areia/argamassa (V_s/V_m) e volume aparente sólido (V_{ap}), tal como sugerido por *Okamura et al.* (2000). No caso da composição que se pretende estudar (composição

Rio Maior) existem duas areias, pelo que deve ser considerado um parâmetro adicional reflectindo a combinação entre as areias, razão areia1/areia total (s_1/s). Neste trabalho foram seleccionados cinco parâmetros (variáveis) para definir a composição de BAC e estabelecer os modelos: $A=V_w/V_p$, $B=w_f/w_c$, $C=Sp/p$, $D=s_1/s$ e $E=V_{ap}$. A razão volumétrica V_s/V_m foi mantida constante e igual a 0.462 (valor da composição base) para todas as composições estudadas. No Anexo C desenvolve-se a formulação da composição do BAC a partir destes parâmetros. A composição base, que ao longo do trabalho será denominada por ponto central, é apresentada no Quadro 3.11 juntamente com os resultados dos ensaios do betão no estado fresco e endurecido.

Quadro 3.11 – Quantidades e caracterização do estado fresco e endurecido da composição de betão de Rio Maior

Parâmetros da composição			Caracterização em laboratório da composição
$V_{ap} \text{ (m}^3\text{)}$	0.557		Resultados no estado fresco: <u>Ensaio espalhamento:</u> Desp=645mm e T50=2.78seg. (aos 15 minutos) <u>Ensaio fluidez:</u> Tfunil=10.07seg. (aos 20 minutos) <u>Ensaio caixa-U:</u> H=335mm (aos 25 minutos) Resultados no estado endurecido: $f_{cm,cubos}(2 \text{ dias}) = 55.4\text{MPa}$ $f_{cm,cubos}(28 \text{ dias}) = 69.0\text{MPa}$
V_s/V_m	0.462		
V_w/V_p	0.855		
s_1/s	0.748		
w_f/w_c	0.510		
Quantidades na composição			
agregado grosso	kg/m^3	810	
areia 1		600	
areia 2		202	
agregado fino		802	
cimento		379	
adição		192	
total de finos		571	
água^{a)}		154.0	
superplastificante		13.20	
$w/c^{b)} = 0.43$	$w/p^{b)} = 0.29$		
Sp/c = 3.48%	Sp/p = 2.31%		

^{a)} Na quantidade da água não está contabilizada a água de absorção dos agregados

^{b)} No cálculo desta relação, ao valor da água é adicionado a quantidade de água do superplastificante

A região modelada encontra-se delimitada pelos valores -1 e +1 das variáveis codificadas, correspondendo aos níveis baixo e alto de cada variável, respectivamente. Para ponto central da região modelada, o nível 0 em cada variável codificada, tomou-se a composição de BAC otimizada utilizando a metodologia proposta na secção 3.2. Assim, nas misturas estudadas, V_w/V_p variou entre 0.791 e 0.919, w_f/w_c variou entre 0.470 e 0.546, Sp/p (líquido) variou entre 0.021 e 0.025, s_1/s variou entre 0.673 e 0.823 e V_{ap} variou entre 0.544 e 0.571. Estes valores foram definidos considerando

uma variação de 7.5% no caso do V_w/V_p , w_f/w_c e Sp/p , uma variação de 10.0% no caso de $s1/s$ e uma variação de 2.5% no caso do V_{ap} .

Quando o número de factores no plano factorial 2^k aumenta, o número de combinações possíveis para estabelecer o plano factorial completo cresce rapidamente tornando-se num processo extremamente moroso. Por exemplo, no caso do plano factorial 2^2 completo são necessárias realizar 4 composições, mas no caso de serem definidas 5 variáveis, como acontece neste estudo, para o plano factorial 2^5 completo é necessário realizar 32 composições. Caso se considere razoável assumir que o efeito dos termos de ordem superior é insignificante relativamente aos efeitos dos termos de ordens mais baixas, pode-se realizar apenas uma fracção do plano factorial completo. Este tipo de abordagem é geralmente utilizado numa fase inicial do estudo, em que existem várias variáveis e se pretende determinar quais as que influenciam a resposta de forma mais determinante. Assim, para descrever as propriedades do BAC adoptou-se um plano factorial fraccionado 2^{5-1} , correspondente a $k=5$ parâmetros, 2 níveis em cada parâmetro e fraccionamento de metade, cuja representação é apresentada de forma esquemática na Figura 3.29 (Montgomery, 1996)

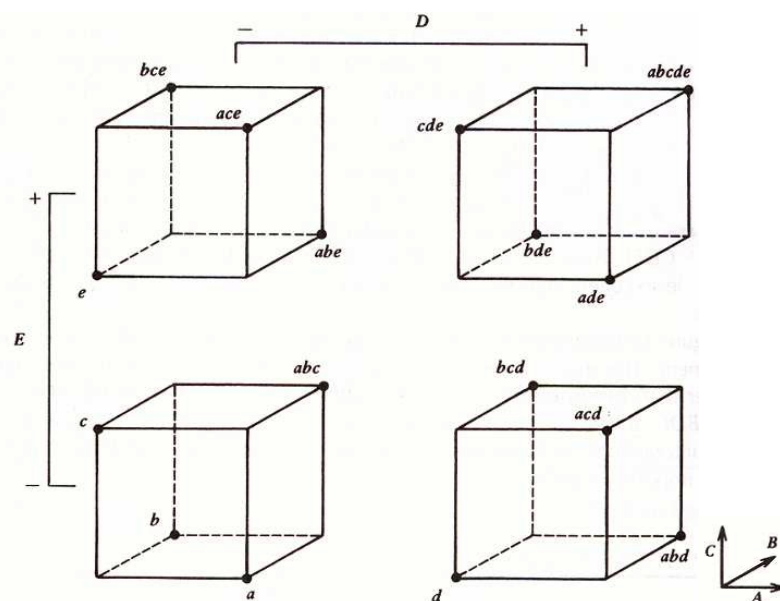


Figura 3.29 – Plano factorial 2^{5-1} (Montgomery, 1996)

Contudo, dado que o presente estudo foi realizado em torno de uma composição considerada otimizada, em geral são necessários modelos de segunda ordem para ajustar a resposta, uma vez que existe curvatura da superfície de resposta verdadeira nessa região (Sonebi, 2004). Por este motivo, ao plano factorial fraccionado 2^{5-1} foram adicionados pontos axiais e pontos centrais, resultando num plano designado por

Plano Factorial Aumentado “Central Composite Design” (CCD) que permite considerar modelos de segunda ordem. Para os casos simples de $k=2$ e $k=3$ este tipo de análise pode ser representada conforme se ilustra na Figura 3.30a e Figura 3.30b, respectivamente.

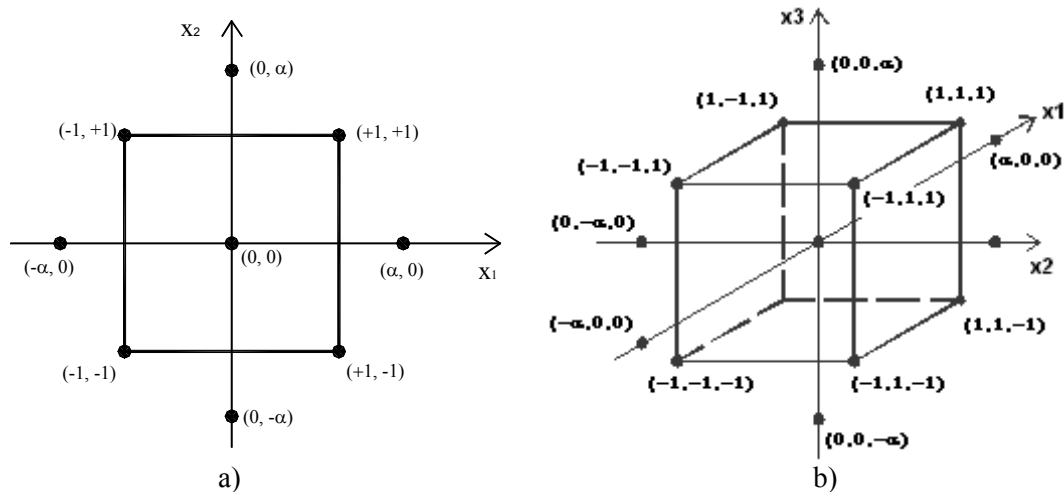


Figura 3.30 – a) CCD para $k=2$; b) CCD para $k=3$ (Montgomery e Runger, 1999)

Os efeitos dos cinco parâmetros ($k=5$) escolhidos, V_w/V_p , w_f/w_c , Sp/p , s_l/s e V_{ap} foram assim avaliados em cinco níveis diferentes, codificados nos valores de $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$. O valor de α deve ser escolhido de tal forma que o desvio padrão dos valores previstos para a resposta seja constante para todos os pontos que se encontrem à mesma distância do ponto central. Recomenda-se $\alpha=F^{1/4}$, onde F é o número de observações na parte factorial do plano ($F=2^{(5-1)}=16$, logo $\alpha=(16)^{1/4}=2$) (Montgomery, 1996). A correspondência entre os valores codificados dos cinco níveis de análise e o valor das diferentes variáveis no programa experimental é apresentado no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 – Correspondência entre os valores codificados e valor das diferentes variáveis no programa experimental

Variável	Valores Descodificados				
	-2	-1	0	1	2
A: V_w/V_p	0.727	0.791	0.855	0.919	0.983
B: w_f/w_c	0.432	0.470	0.508	0.546	0.584
C: Sp/P	0.019	0.021	0.023	0.025	0.027
D: s_l/s	0.598	0.673	0.748	0.823	0.898
E: V_{ap}	0.414	0.544	0.557	0.571	0.584

Assim sendo, segundo o plano factorial seleccionado é necessário estudar 30 composições das quais 16 correspondem ao desenho plano fraccionado (2^{5-1}), 10 dizem respeito a pontos axiais assumidos e 4 são relativas ao ponto central. A repetição do ponto central permitirá avaliar o erro inerente à variabilidade das características dos materiais e às condições e procedimentos de ensaio. O Quadro 3.13 apresenta o conjunto total de composições estudadas, definidas segundo o plano factorial seleccionado, e os respectivos valores codificados que cada uma das variáveis assumiu no presente estudo.

Quadro 3.13 – Valores codificados das diferentes variáveis no programa experimental

Composição	Tipo de ponto	V_w/V_p	W_f/W_c	Sp/p	S_1/s	V_{ap}
0 (*)	Central	0	0	0	0	0
1	Factorial	-1	-1	-1	-1	1
2	Factorial	1	-1	-1	-1	-1
3	Factorial	-1	1	-1	-1	-1
4	Factorial	1	1	-1	-1	1
5	Factorial	-1	-1	1	-1	-1
6	Factorial	1	-1	1	-1	1
7	Factorial	-1	1	1	-1	1
8	Factorial	1	1	1	-1	-1
9	Factorial	-1	-1	-1	1	-1
10	Factorial	1	-1	-1	1	1
11	Factorial	-1	1	-1	1	1
12	Factorial	1	1	-1	1	-1
13	Factorial	-1	-1	1	1	1
14	Factorial	1	-1	1	1	-1
15	Factorial	-1	1	1	1	-1
16	Factorial	1	1	1	1	1
17	Axial	2	0	0	0	0
18	Axial	-2	0	0	0	0
19	Axial	0	2	0	0	0
20	Axial	0	-2	0	0	0
21	Axial	0	0	2	0	0
22	Axial	0	0	-2	0	0
23	Axial	0	0	0	2	0
24	Axial	0	0	0	-2	0
25	Axial	0	0	0	0	2
26	Axial	0	0	0	0	-2

(*) foram realizadas 4 experiências para o ponto central, em dias diferentes, com o objectivo de estimar o erro

No estudo em causa e atendendo a que se pretende avaliar a variação das propriedades do betão fresco e endurecido quando ocorrem pequenas alterações na quantidade dos materiais, foram consideradas como variáveis de resposta o diâmetro de espalhamento (y_{Desp}), tempo necessário para atingir um diâmetro de 50cm (y_{T50}), tempo necessário para escoar o betão no funil V (y_{Tfunil}), altura de enchimento na

caixa (y_H) e resistência à compressão aos 28 dias ($y_{fc,28\text{dias}}$), referenciadas neste trabalho por Desp, T50, Tfunil, H e $fc_{28\text{dias}}$, respectivamente.

3.3.2 Resultados dos ensaios

Para cada uma das composições estudadas foi realizada uma amassadura de 25l numa misturadora de eixo vertical. A ordem de introdução dos materiais constituintes na misturadora e a sequência da mistura é a descrita no anexo B.

As composições do programa experimental foram testadas numa ordem aleatória, incluindo as composições do ponto central. No final de cada amassadura foram realizados os ensaios de espalhamento, fluidez (funil-V) e da caixa-U para caracterizar o betão no estado fresco. Após estes ensaios foram moldados 3 cubos de 150 mm para avaliação da tensão de rotura à compressão simples de cada mistura. Os provetes foram desmoldados com 1 dia de idade e levados para uma câmara húmida ($\text{Temp} \approx 20^\circ\text{C}$; $\text{HR} \approx 100\%$) onde foram mantidos até aos 28 dias, idade em que se realizou o ensaio de rotura à compressão simples. Com este conjunto de ensaios foram recolhidos dados para as variáveis de resposta: diâmetro de espalhamento (Desp); tempo necessário para atingir um diâmetro de 50cm (T50), tempo necessário para escoar o betão no funil V (Tfunil), altura de enchimento na caixa (H) e resistência à compressão aos 28 dias ($fc_{28\text{dias}}$).

No Quadro 3.14 apresentam-se as quantidades dos materiais e os valores observados em cada uma das variáveis de resposta, para as 30 misturas. Observando os resultados obtidos verifica-se que as variações introduzidas nos 5 parâmetros considerados no programa experimental abrangeram um intervalo bastante alargado de betões auto-compactáveis, com o Desp a variar desde os 505mm a 750mm, o T50 variar desde 1.47s a 6.31s, Tfunil variar desde 6.59s a 28.47s e $fc_{28\text{dias}}$ variar desde 52.20MPa a 75.31MPa. Todas as composições passaram o ensaio da caixa exibindo uma altura de enchimento superior a 300mm ($H > 300\text{mm}$), o que significa que a resistência ao bloqueio não é um aspecto crítico para as composições na região analisada, facto que pode ser atribuído à pequena dimensão máxima do agregado grosso e ao baixo conteúdo deste agregado nas composições.

Quadro 3.14 – Quantidades dos materiais constituintes na mistura, propriedades no estado fresco e endurecido das diferentes composições estudadas

Composição	W _c (kg/m ³)	W _f (kg/m ³)	W _{sp} (kg/m ³)	W _w (kg/m ³)	W _{s1} (kg/m ³)	W _{s2} (kg/m ³)	W _g (kg/m ³)	Desp (mm)	T50 (s)	Tfunil (s)	H (mm)	fc,28dias (MPa)
0	380	193	13,23	165	600	202	810	645,0	3,00	10,94	320	64,79
0	380	193	13,23	165	600	202	810	665,0	2,84	10,53	335	62,16
0	380	193	13,23	165	600	202	810	657,5	2,40	9,28	340	62,01
0	380	193	13,23	165	600	202	810	650,0	2,66	10,03	337	62,16
1	400	188	12,56	157	534	260	830	525,0	6,21	21,16	305	62,39
2	382	180	11,99	174	547	266	789	692,5	1,75	8,16	340	59,70
3	388	212	12,79	160	547	266	789	585,0	3,60	13,53	325	57,48
4	354	193	11,66	170	534	260	830	650,0	2,22	8,41	327	57,46
5	410	193	14,94	160	547	266	789	588,0	5,25	19,94	323	66,77
6	374	176	13,62	170	534	260	830	693,0	2,06	9,03	338	60,98
7	379	207	14,52	157	534	260	830	590,0	4,25	16,75	318	62,39
8	362	198	13,87	174	547	266	789	743,0	1,47	6,94	330	58,86
9	410	193	12,85	160	667	144	789	600,0	3,53	14,00	325	62,54
10	374	176	11,72	170	652	141	830	660,0	2,57	7,66	338	58,66
11	379	207	12,49	157	652	141	830	552,5	6,31	19,10	305	65,80
12	362	198	11,93	174	667	144	789	695,0	1,78	8,44	340	57,56
13	400	188	14,59	157	652	141	830	610,0	3,50	15,19	327	66,35
14	382	180	13,94	174	667	144	789	707,5	1,68	7,37	340	67,34
15	388	212	14,86	160	667	144	789	620,0	3,47	14,13	330	67,10
16	354	193	13,55	170	652	141	830	747,5	1,50	6,59	340	57,47
17	356	181	12,37	178	600	202	810	750,0	1,84	6,72	335	52,20
18	409	207	14,21	151	600	202	810	505,0	14,44 (*)	28,47	305	75,31
19	360	210	13,16	165	600	202	810	685,0	2,38	10,15	340	62,01
20	403	174	13,30	165	600	202	810	640,0	2,72	11,84	337	65,03
21	380	193	15,21	165	600	202	810	707,5	2,53	9,41	340	61,91
22	380	193	11,24	165	600	202	810	595,0	4,40	11,78	327	59,81
23	380	193	13,23	165	719	82	810	640,0	3,87	10,50	337	66,17
24	380	193	13,23	165	481	323	810	650,0	3,06	9,91	337	59,42
25	371	189	12,92	162	586	198	850	650,0	2,81	10,94	325	54,09
26	389	198	13,53	169	614	207	769	650,0	3,22	10,56	340	59,25

(*) Esta observação foi excluída na análise de T50

3.3.3 Modelos de resposta

A determinação, ajuste e análise dos modelos de resposta foi realizada recorrendo a um software comercial específico, o “Design-Expert”. A cada conjunto de valores de resposta, obtidos durante o programa experimental, é ajustado um modelo de resposta usando análises de regressão e análises de variância (ANOVA). O modelo é validado através de uma análise de resíduos, onde são analisadas as suas tendências e identificados possíveis *outliers* (valores discrepantes). Posteriormente o modelo de resposta é avaliado e interpretado recorrendo a representações gráficas (Vaughn, Polnaszek *et al.*, 2000).

3.3.3.1 Modelos ajustados

Tendo por base as 30 observações realizadas no âmbito do CCD (*Plano Factorial Aumentado*) e utilizando uma análise de regressão polinomial procurou-se o modelo quadrático ($Z=2$) com o melhor ajuste à resposta de cada propriedade. Note-se que o objectivo da escolha adequada do polinómio de grau Z é o de obter uma relação que descreva o comportamento geral do fenómeno com o polinómio de grau mais baixo. À medida que o grau do polinómio aumenta há uma tendência para a perda de relevância do andamento fundamental do fenómeno, a favor de aspectos particulares (Pestana e Gageiro, 2005).

A forma genérica do modelo de segunda ordem é apresentada na Equação (3.15), onde y é a resposta, x_i são as variáveis, β_0 é o termo independente, β_i , β_{ii} e β_{ij} são os coeficientes dos termos dependentes e ε é a parcela que representa o erro de modelação representando o efeito das variáveis com termos de ordem superior que não foram consideradas no modelo (Montgomery, 1996).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_{ij} + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_{ij}^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.15)$$

O modelo representado na equação anterior designa-se por modelo de regressão polinomial simples de grau 2, e pode ser convertido num modelo de regressão linear múltipla bastando para isso realizar uma transformação de variáveis $\left(\sum_{i=1}^k x_i^2 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^k w_i \right)$.

A este tipo de modelo estão subjacentes as hipóteses de que os valores x_i são encarados como constantes predeterminadas, sem erro e os erros ε_n , são mutuamente independentes, tem valor esperado nulo, variância constante, σ^2 , e são Normalmente distribuídos, isto é, $\varepsilon \rightarrow \text{IN}(0, \sigma^2)$. Os parâmetros β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} do modelo podem ser estimados a partir do conjunto de observações (X_n, Y_n) recorrendo ao método dos mínimos quadrados, técnica de optimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados de forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças das ordenadas (resíduos) e são válidos apenas para as composições cujas variáveis se encontrem no intervalo de valores apresentado no Quadro 3.12. No Anexo E é apresentado de uma forma detalhada o modelo de regressão linear múltipla e os pressupostos que lhe estão subjacentes, bem como a metodologia para estimar os regressores através do Método dos Mínimos Quadrados.

Na análise de modelos de regressão linear múltipla, admitiu-se, até agora, que as variáveis independentes (também designadas por regressores) eram especificadas à partida. No entanto, na maioria das situações práticas, mesmo com um adequado conhecimento teórico sobre a natureza das relações causa-efeito entre diferentes variáveis em jogo, não se consegue especificar à partida com segurança, qual o conjunto “ideal” de regressores que devem ser incluídos no modelo. Um cenário mais realista é aquele no qual existe uma multiplicidade de regressores potencialmente úteis na explicação do comportamento da variável de resposta, havendo que seleccionar de entre eles quais os que são efectivamente significantes para figurar no modelo (Guimarães e Cabral, 1998). Neste trabalho foi utilizado o *Método Regressivo* para eliminar os termos sem significado do modelo de regressão (Vaughn, Polnaszek *et al.*, 2000). No *Método Regressivo* incluem-se à partida todos os regressores potenciais, e posteriormente vão-se retirando do modelo, um a um, regressores cuja presença não contribua para explicar uma proporção significativa da variação total da variável dependente. Em cada momento, de todos os regressores que não contribuam para explicar uma proporção significativa da variação total, retira-se aquele que menos contribui para a explicação desta variação (Guimarães e Cabral, 1998).

Uma análise de variância, muitas vezes designada por ANOVA (*analysis of variance*), pode geralmente ser utilizada para confirmar este tipo de interpretações. A análise de variância é uma técnica estatística que para além de permitir construir intervalos de confiança ou testar hipóteses envolvendo parâmetros de uma população, possibilita a comparação entre parâmetros de mais do que duas populações (neste caso entre um regressor e o erro) (Guimarães e Cabral, 1998). A partir da análise da dispersão total presente num conjunto de dados, a análise de variância permite identificar os factores que

deram origem a essa dispersão e avaliar a contribuição de cada um deles. O Quadro 3.15, explicada detalhadamente no Anexo E, sintetiza a análise ANOVA para o caso de um modelo de regressão linear múltipla.

Quadro 3.15 – Tabela ANOVA para o modelo de regressão linear múltipla (Guimarães e Cabral, 1998)

Fontes de Variação	Devida à regressão (DR)	Residual (R)	Total (T)
Variações (Somas de desvios quadráticos)	(Variação “explicada” pela regressão) $VDR=B_1.S_{x_1y}+...+ B_J.S_{x_Jy}$	(Variação residual “não explicada”) $VR=S_{yy}-VDR$	(Variação total) $VT=S_{yy}$
Graus de Liberdade (Número de termos independentes)	$GL_1=J$	$GL_2=N-J-1$	$GL=GL_1+GL_2=N-1$
Desvios Quadráticos Médios	$DQMDR=VDR/GL_1$	$DQMR=VR/GL_2$	-
Valores Esperados	$E[DQMDR]=\sigma^2+[f(B_1,...,B_J)]^2$	-	-

A análise de variância permite conhecer se a variável de resposta y responde ou não às alterações das variáveis independentes, testando se alguns dos parâmetros β 's são ou não nulos. Aceitar que alguns destes parâmetros sejam nulos, significa que os correspondentes regressores não vão contribuir para a explicação de variações em y , e portanto devem ser excluídos da análise (Pestana e Gageiro, 2005). Utilizando o procedimento estatístico denominado por *teste de hipóteses* é possível avaliar se os efeitos dos parâmetros β são ou não significativamente diferentes de zero, ver equações (3.16) e (3.17).

$$H_0 : \beta_0 = \beta_i = \beta_{ii} = \beta_{ij} = 0 \quad (3.16)$$

$$H_1 : \text{algum } \beta \neq 0 \quad (3.17)$$

A estatística que é utilizada para verificar a plausibilidade da hipótese nula designa-se por estatística de teste, sendo neste caso denominada por *valor F*, razão entre as variâncias $\sigma_{x_1}^2$ (DQMDR) e $\sigma_{x_2}^2$ (DQMR) de duas populações normais X_1 (regressor) e X_2 (resíduo) (Equação (3.18)). Quando H_0 é verdadeira e são normais as populações a partir das quais se obtêm as amostras, a estatística de teste segue uma distribuição tipo F , distribuição da variável aleatória obtida ($F_{j,N-J-1}$). Para que a estatística de teste possa

cumprir a sua função, é necessário conhecer a sua distribuição quando se admitir que é verdadeira a hipótese nula (Equação (3.19)) (Montgomery, 1996).

$$Valor F = \frac{DQMDR}{DQMR} \quad (3.18)$$

$$H_0 \text{ verdadeira} \Rightarrow \text{valor } F \rightarrow F_{j, N-J-1} \quad (3.19)$$

A probabilidade α , no caso de H_0 ser verdadeira, do *valor F* pertencer à região de rejeição designa-se por *nível de significância* do teste, que neste estudo foi estipulado de 0.05 ($\alpha=5\%$). Para cada um dos termos do modelo (regressores) deve-se examinar o valor da probabilidade deste se aproximar de 0 ($\text{Prob}>F$). Em geral, considera-se que uma probabilidade inferior a 0.05 é evidência suficiente de que o parâmetro tem elevada influência na resposta. No Anexo E é descrito de forma mais detalhada o teste de hipóteses utilizado bem como o cálculo do *valor F*.

No Quadro 3.16 apresenta-se uma tabela retirada do programa comercial utilizado, onde é sintetizada a análise de variância (ANOVA) realizada para a resposta do diâmetro de espalhamento (Desp). Nesse mesmo quadro é possível verificar que todos os regressores escolhidos apresentam uma probabilidade de se aproximarem de 0 menor que 0.05, inferior portanto ao nível de significância seleccionado.

Quadro 3.16 – Tabela ANOVA para o diâmetro de espalhamento (retirado do programa *Design Expert*)

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	102325.48	6	17054.25	77.76	< 0.0001	significant
A (Vw/Vp)	82602.67	1	82602.67	376.66	< 0.0001	
B (wf/wc)	1617.04	1	1617.04	7.37	0.0123	
C (Sp/p)	13254.00	1	13254.00	60.44	< 0.0001	
E (Vap)	1717.04	1	1717.04	7.83	0.0102	
CE(Sp/p x Vap)	1743.06	1	1743.06	7.95	0.0097	
A ² (Vw/Vp) ²	1391.67	1	1391.67	6.35	0.0192	
Residual	5043.99	23	229.30			
Lack of Fit	4814.30	20	240.71	3.31	0.1878	not significant
Puré Error	229.69	3	76.56			
Cor Total	107369.47	29				

Os modelos obtidos para cada variável de resposta bem como os respectivos erros residuais e coeficientes de correlação são apresentados no Quadro 3.17. Para além do coeficiente de determinação (R^2) é apresentado o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{\text{corrigido}}$), coeficiente utilizado quando se pretende inferir acerca de um modelo ajustado a partir de uma amostra limitada, como é o caso. Todos os modelos apresentam um valor do coeficiente de determinação ajustado relativamente alto, observando-se que os modelos das variáveis de reposta Desp e Tfunil são aqueles que apresentam um melhor ajuste ($R^2_{\text{corrigido}} > 90\%$). Para cada uma das propriedades analisadas apresenta-se no Anexo E o modelo ajustado com as variáveis em valores codificados e valores reais, o quadro da análise de variância, a análise descritiva dos resultados obtidos, o coeficiente de correlação e coeficiente de correlação ajustado e os intervalos de confiança para um nível de 95% para os coeficientes estimados.

Quadro 3.17 – Modelos ajustados (variáveis em valores codificados)

Propriedade:	Diâmetro espalhamento	T50	Tempo escoamento	Altura de enchimento	Resistência à compressão, 28 dias
	Desp=	T50=	$1/\sqrt{T_{\text{funil}}}$=	H=	fc,28 dias=
Termo independente	650.53	2.936	0.304	333.36	63.00
V_w / V_p	58.67	-1.291	0.054	8.12	-3.29
w_f / w_c	8.21	-0.110	0.006	SS	-1.11
S_p / p	23.5	-0.355	SS	2.79	1.25
s_1 / s	SS	-0.035	0.004	SS	1.26
V_{ap}	-8.46	0.220	SS	-3.54	-0.67
$w_f / w_c \times s_1 / s$	SS	0.344	-0.009	SS	SS
$S_p / p \times V_{ap}$	10.44	-0.451	SS	3.44	-1.24
$(V_w / V_p)^2$	-6.95	0.316	SS	-3.95	SS
V_{ap}^2	SS	SS	SS	SS	-1.46
Parcela do erro, ε (*)					
Média	0	0	0	0	0
Desvio padrão	14.809	0.553	0.016	5.521	2.581
R^2	0,95	0,86	0.92	0.79	0.76
$R^2_{\text{corrigido}}$	0.94	0.81	0.91	0.74	0.68

(SS) variável sem significado para o modelo;

(*) a parcela do erro segue uma lei normal.

Após a determinação do modelo de resposta realizou-se uma análise de resíduos, que consiste numa análise pormenorizada com vista a averiguar a conformidade entre valores medidos e valores previstos, detectar eventuais outliers (valores discrepantes) e avaliar da normalidade dos resíduos. O diagnóstico dos modelos pode assim ser realizado à custa da observação do seguinte conjunto de representações:

- a) Representação dos valores medidos versus valores estimados pelo modelo: pretende-se que os pontos se aproximem o mais possível da diagonal no gráfico.
- b) Representação dos resíduos estudentarizados internos em escala normal: os testes de hipóteses e os intervalos estimados pressupõem que a distribuição dos erros siga uma lei normal, ou seja, neste tipo de representação os pontos devem ficar aproximadamente alinhados segundo uma recta. Uma distribuição dos pontos não-linear (por exemplo, com uma forma em S) pode ser eventualmente corrigida através de uma transformação de variáveis do tipo \sqrt{y} , $\ln y$ ou $1/y$.
- c) Representação dos resíduos estudentarizados internos versus valores estimados: os erros devem apresentar variância constante na direcção vertical e a dispersão dos pontos deve ser simétrica relativamente ao eixo horizontal que passa em zero.
- d) Representação da *distância de Cook* (D_i): um valor com $D_i > 1$ indica que o respectivo resultado tem uma influência grande nas propriedades do modelo (Montgomery e Runger, 1999).
- e) Representação dos resíduos estudentarizados externos para averiguar a existência de outliers: valores fora do intervalo (-2, 2) podem indicar a presença de outliers, isto é, observações distintas das demais que estão associadas a resíduos com valores elevados (Montgomery e Runger, 1999).

Uma explicação mais detalhada de cada uma das representações é apresentada no Anexo E.

As figuras seguintes dizem respeito ao diagnóstico que validou o modelo de resposta proposto para o diâmetro de espalhamento. Analisando os gráficos observa-se uma boa correspondência entre os valores previstos e valores medidos (Figura 3.31), os resíduos apresentam uma distribuição aproximadamente normal (Figura 3.32) e não foram detectados outliers (Figura 3.33). No Anexo E para além de se apresentar informação

detalhada sobre cada um dos modelos inclui-se as representações gráficas usadas no diagnóstico da qualidade dos modelos bem como o respectivo significado.

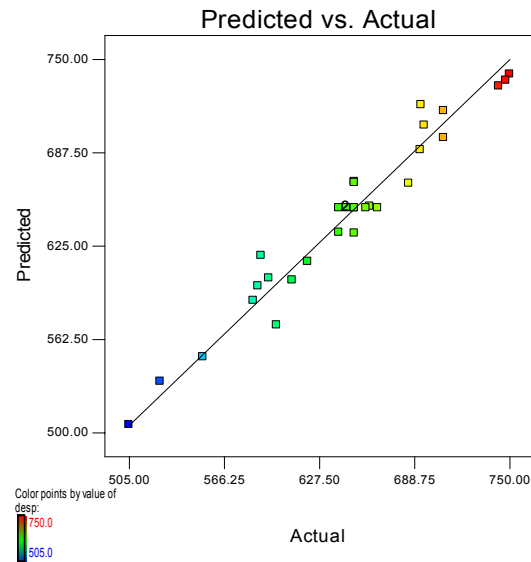


Figura 3.31 – Valores medidos versus valores previstos da resposta Desp

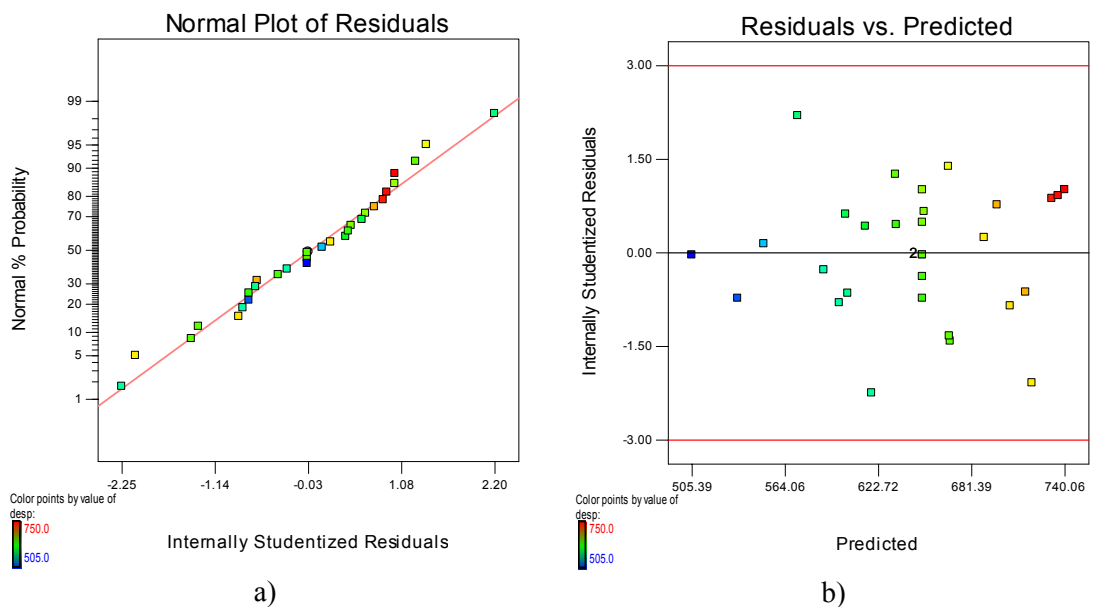


Figura 3.32 – a) Resíduos estudentarizados internos numa escala normal da resposta Desp; b) Resíduos estudentarizados internos versus valores estimados da resposta Desp

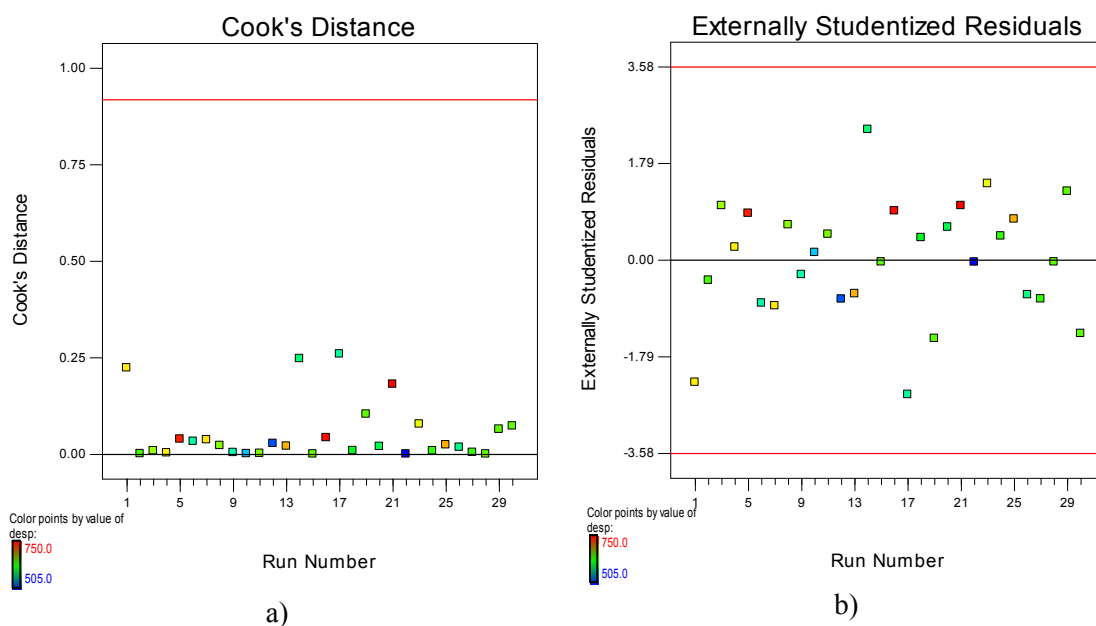


Figura 3.33 – a) Distância de Cook da resposta Desp; b) Resíduos estudentarizados externos para averiguar a existência de outliers da resposta Desp

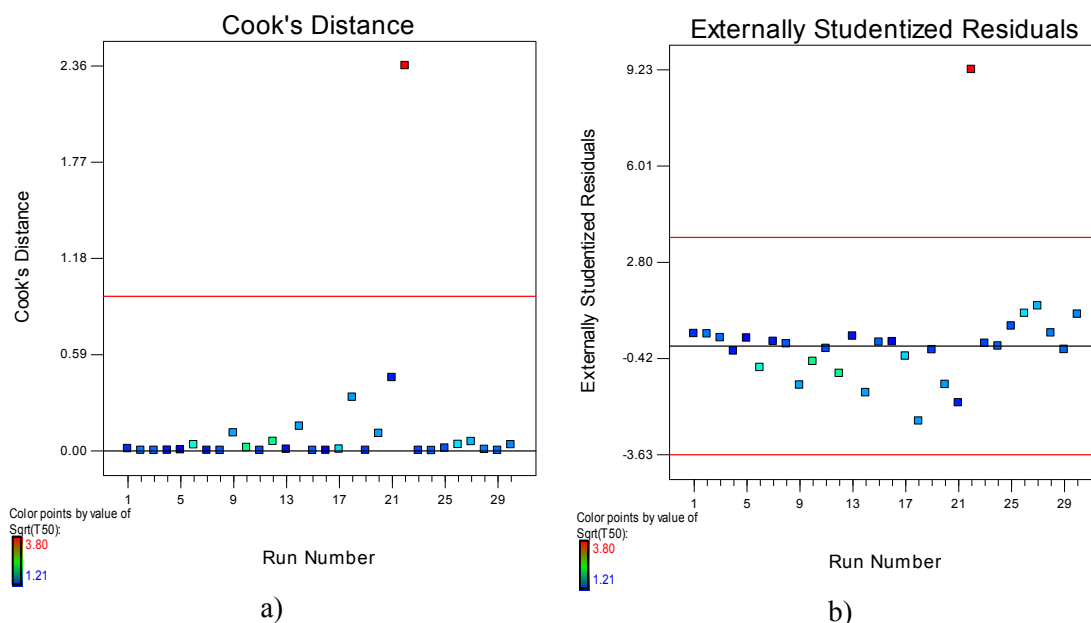


Figura 3.34 – a) Distância de Cook da resposta T50; b) Resíduos estudentarizados externos para averiguar a existência de outliers da resposta T50

As observações que apresentam um grande afastamento das restantes são habitualmente designadas por outliers. O estudo destas observações constitui uma das etapas mais importantes em qualquer análise estatística, na medida em que permite avaliar a qualidade das observações. Nos valores observados para a variável de resposta T50

detectou-se a existência de um “outlier”, destacado a vermelho na Figura 3.34, trata-se da observação T50=14.4s, assinalada com (*) no Quadro 3.14. Este valor foi eliminado do conjunto de observações por influenciar demasiado o ajuste do modelo, afastando-se demasiado dos restantes resultados e do intervalo de aceitação [2.0;5.0] (s).

No caso da variável de resposta Tfunil houve necessidade de efectuar uma transformação da variável, do tipo $1/\sqrt{y}$, para melhorar a distribuição dos resíduos. Realizando uma representação em escala normal dos resíduos estandarizados internos é possível observar uma distribuição de resíduos em forma de S (distribuição não-linear), ver Figura 3.35a, enquanto que após a transformação de variável ($1/\sqrt{T_{funil}}$) a distribuição dá-se de uma forma aproximadamente linear, ver Figura 3.35b.

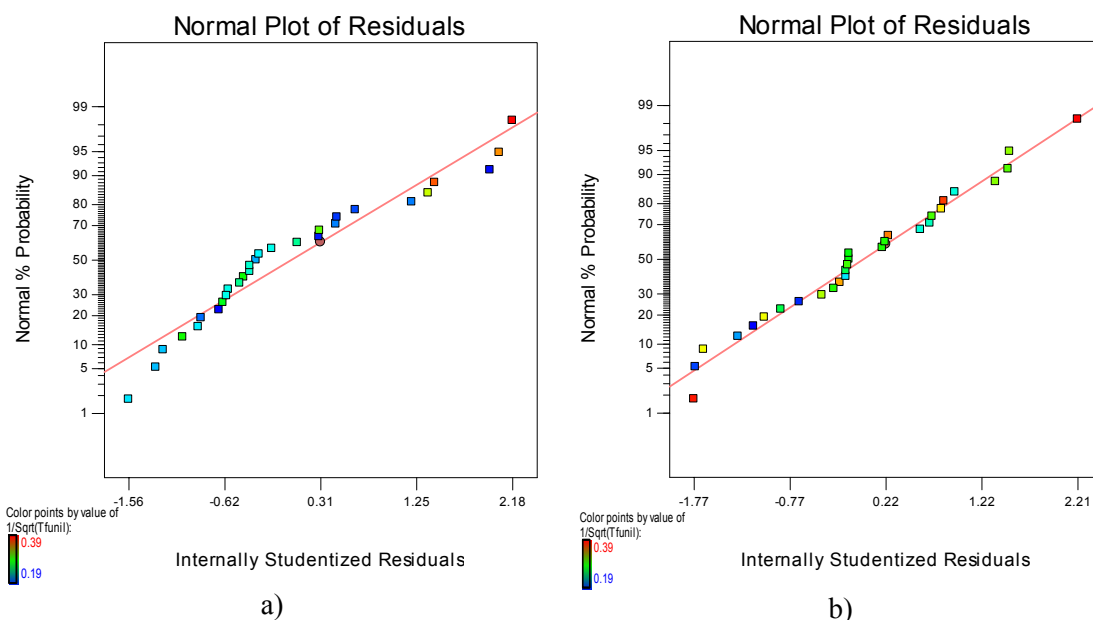


Figura 3.35 – a) Resíduos estandarizados internos da resposta Tfunil; b) Resíduos estandarizados internos da resposta $1/\sqrt{T_{funil}}$

3.3.3.2 Precisão dos modelos propostos

Apesar da maioria dos modelos ajustados apresentar um coeficiente de determinação relativamente elevado (Quadro 3.17) a qualidade e precisão do ajuste deve ser verificada. Segundo *Yahia et al.* (2001) a precisão dos modelos ajustados pode ser avaliada comparando o desvio padrão da parcela do erro (Quadro 3.17) com o desvio padrão calculado para as várias repetições do ponto central (erro experimental). Assume-se um

bom ajuste quando o desvio padrão da parcela do erro do modelo não excede demasiado o erro experimental.

Os resultados de 4 experiências do ponto central realizadas no âmbito do CCD (*Plano Factorial Aumentado*) conjuntamente com 4 experiências do ponto central, realizadas num estudo laboratorial anterior, foram analisadas com o objectivo de estimar o erro experimental, erro associado a variações nos materiais, erro nas pesagens ou erro de experimentação. No Quadro 3.18 são apresentadas, através dos valores codificados de cada uma das variáveis, as 8 composições realizadas no âmbito do estudo laboratorial anterior ao estudo da robustez, 4 das quais correspondentes ao ponto central. No mesmo quadro pode ainda observar-se as propriedades do betão fresco e endurecido das diferentes composições.

Quadro 3.18 – Composições analisadas no âmbito do estudo laboratorial anterior ao estudo da robustez e respectivas propriedades no estado fresco e endurecido.

Vw/Vp	w _f /w _c	Sp/p	s _l /s	V _{ap}	Desp. (mm)	T50 (s)	Tfunil (s)	H (mm)	fc,28dias (MPa)
0	0	0	0	0	645.0	2.78	10.07	35	69.03
0	0	0	0	0	630.0	3.10	10.69	20	69.17
0	0	0	0	0	683.0	2.59	9.44	22	--
0	0	0	0	0	670.0	2.72	10.09	18	62.82
1	0	0	0	0	705.0	2.57	7.85	40	65.20
-1	0	0	0	0	610.0	3.97	3.47	30	68.90
0	0	-1	0	0	645.0	2.47	0.43	32	61.85
0	0	1	0	0	697.5	2.66	0.72	25	66.03

O Quadro 3.19 apresenta a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e o erro estimado para a média correspondente a um nível de confiança de 95%, que resultam dos valores medidos das diferentes propriedades do betão nas 8 experiências no ponto central. As 8 experiências relativas ao ponto central foram realizadas em dias diferentes ao longo do estudo e, por isso, os resultados do Quadro 3.19 são uma medida da variabilidade associada a cada um dos ensaios. Os resultados com menor variabilidade estão associados ao Desp (2.6%) e H (2.8%), enquanto que a variável de resposta com maior coeficiente de variação foi a T50 (8.1%). Comparando os valores do desvio padrão das 8 experiências do ponto central com os valores do desvio padrão da parcela do erro dos modelos conclui-se que a generalidade dos modelos constituem um bom ajuste para as respectivas variáveis de resposta. O desvio padrão medido no ponto central é sempre mais alto ou semelhante ao desvio padrão da parcela do erro do respectivo modelo, excepto no caso do T50.

Quadro 3.19 – Repetibilidade dos resultados

Pontos centrais n=8	Desp (mm)	T50 (s)	Tfunil (s)	H (mm)	fc,28 dias (MPa)
Média	655.7	2.76	10.13	328	64.6
Desvio padrão	16.7	0.22	0.58	9.2	3.2
Coefficiente de variação	2.6%	8.1%	5.7%	2.8%	5.0%
Erro estimado para a média para um nível de confiança de 95%	± 11.6	± 0.15	± 0.40	± 6.3	± 2.4

A qualidade do ajuste dos modelos propostos pode ser igualmente avaliada comparando os valores medidos das 8 composições analisadas no âmbito do estudo laboratorial anterior com os valores estimados pelos modelos ajustados. Na Figura 3.36 à Figura 3.38 é possível observar os pares de valores medido-estimado para as diferentes variáveis de resposta das 8 composições. Nessas mesmas figuras foram ainda representadas as linhas correspondentes aos intervalos de previsão a 95% dos modelos ajustados para cada uma das variáveis de resposta. Analisando as figuras observa-se que os modelos propostos estimam com suficiente precisão as propriedades do BAC analisadas, verificando-se que todos os pontos caem dentro dos intervalos de previsão, com excepção de dois deles no caso da variável de resposta H. De salientar que o modelo ajustado para a variável H foi dos que apresentou o menor coeficiente de correlação.

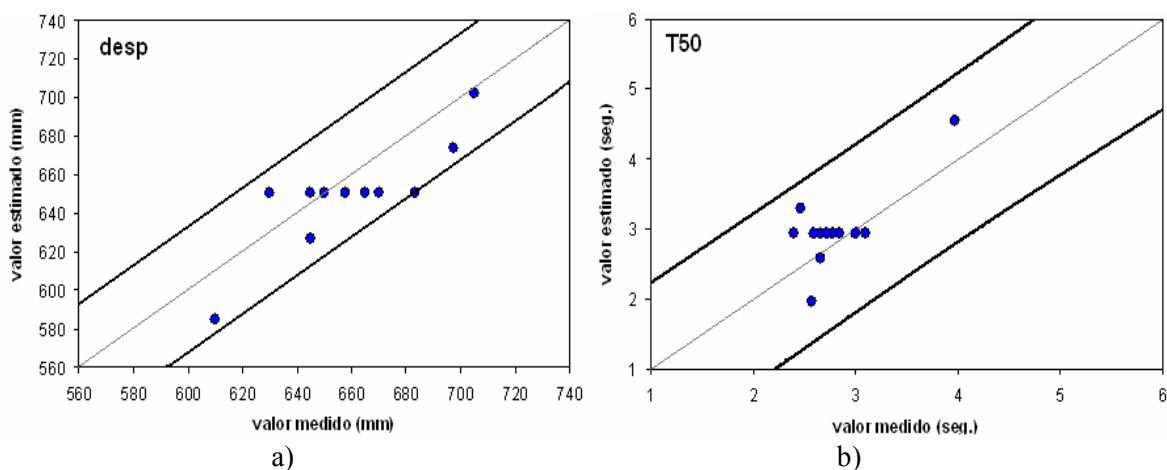


Figura 3.36 – Valores medidos versus valores previstos pelo modelo ajustado: a) para o diâmetro de espalhamento; b) para o T50

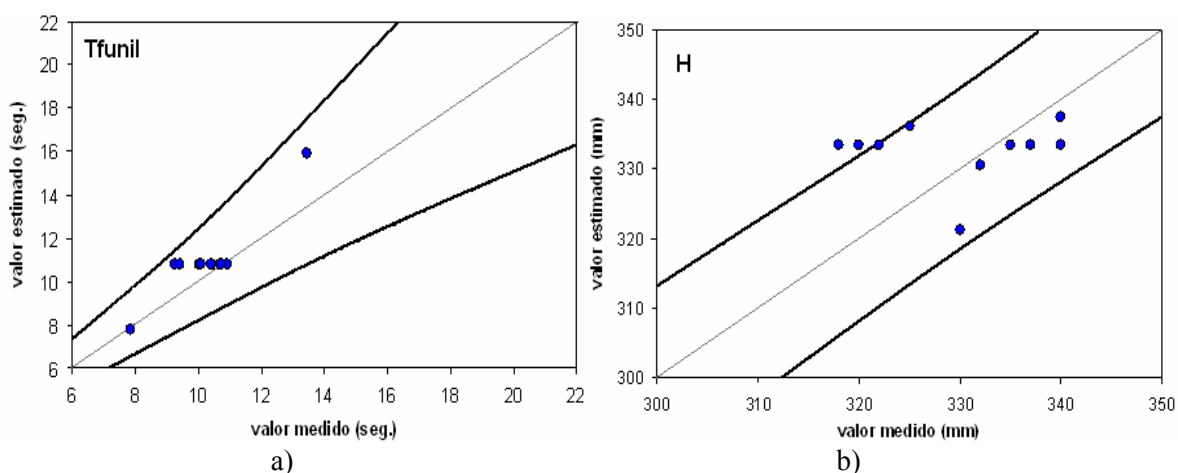


Figura 3.37 – Valores medidos versus valores previstos pelo modelo ajustado: a) para o tempo de escoamento no funil-V; b) para a altura de enchimento

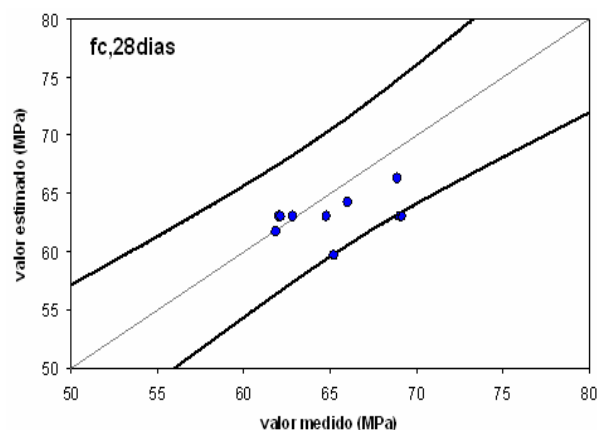


Figura 3.38 – Valores medidos versus valores previstos pelo modelo ajustado para a resistência à compressão avaliada em cubos, aos 28 dias

Os valores da razão valor estimado/valor medido no caso das variáveis resposta Desp, T50, Tfunil, H e $f_{c,cubos}$ (28 dias) variaram entre 0.95 e 1.03, 0.76 e 1.33, 0.99 e 1.18, 0.97 e 1.05, 0.91 e 1.02, respectivamente. Tal como observado anteriormente, estes valores indicam uma boa precisão dos modelos estabelecidos, à exceção do caso da variável de resposta T50 onde este rácio se afasta mais da unidade.

3.3.4 Efeitos individual e de interacção de cada um dos parâmetros

3.3.4.1 Efeito individual de cada um dos parâmetros

Os modelos apresentados no ponto anterior podem ser utilizados para avaliar o efeito individual relativo de cada um dos parâmetros da composição na resposta. Os coeficientes estimados em cada modelo, apresentados no Quadro 3.17, fornecem uma indicação do efeito relativo dos vários parâmetros da mistura em cada variável de resposta. Naturalmente que coeficientes mais elevados denotam uma maior influência desse parâmetro na resposta e por outro lado, um coeficiente negativo traduz-se num decréscimo na resposta caso esse parâmetro aumente.

Nas figuras seguintes analisa-se o efeito de uma variação em cada um dos factores supondo que os restantes factores se mantêm constantes, no nível zero de referência, isto é, cada linha traçada corresponde ao efeito daquele factor na variável de resposta quando todos os outros factores permanecem no nível zero. Linhas mais inclinadas correspondem a parâmetros com maior influência na variável de resposta em causa, enquanto que linhas aproximadamente horizontais significam que o parâmetro em estudo não tem grande significado na resposta. Nestas figuras os parâmetros A, B, C, D e E correspondem às variáveis V_w/V_p ; w_f/w_c ; Sp/p ; s_1/s e V_{ap} , respectivamente. A título de exemplo ilustra-se o efeito de cada parâmetro na variável de resposta Desp e Tfunil, figuras 3.39a e 3.39b respectivamente.

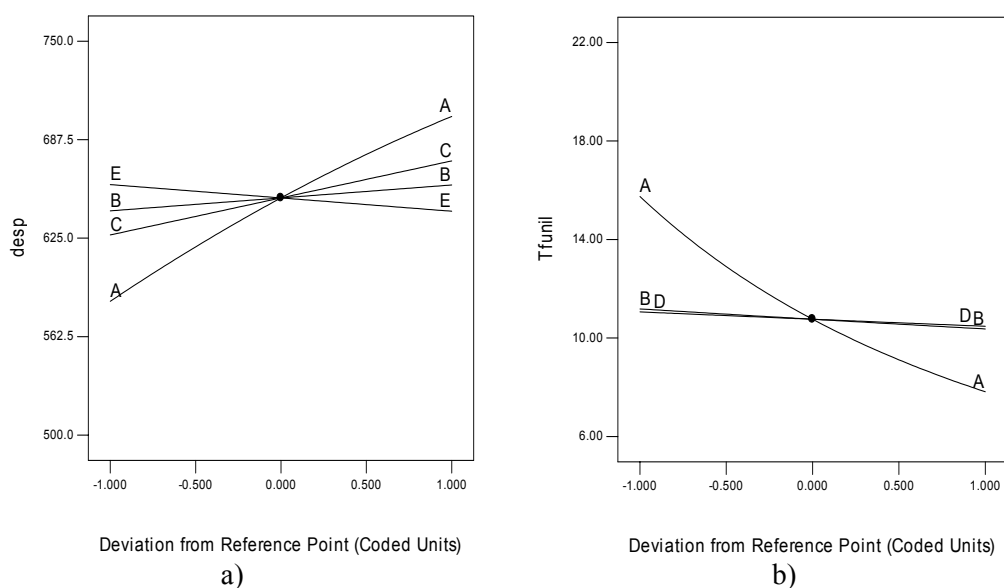


Figura 3.39 – Efeito de uma variação nos parâmetros que intervêm na resposta: a) Desp; b) Tfunil

Para todas as propriedades analisadas verifica-se que o maior efeito isto é, maior variação na resposta, está associado à variável V_w/V_p (parâmetro A). Das restantes variáveis, Sp/p e V_{ap} são as que mais influenciam as propriedades do BAC. Analisando por exemplo a resposta T_{funil} observa-se que as linhas correspondentes aos efeitos de w_f/w_c (parâmetro B) e de s_1/s (parâmetro D) são praticamente horizontais, demonstrando uma influência muito reduzida na resposta.

3.3.4.2 Efeito de interacção entre parâmetros

Uma interacção entre parâmetros (variáveis) ocorre quando a resposta é diferente dependendo do nível desses parâmetros. Num modelo de resposta, existe interacção entre variáveis quando a diferença da resposta entre os níveis de uma variável não é a mesma para todos os níveis das outras variáveis (Montgomery e Runger, 1999). Os gráficos apresentados na Figura 3.40 representam a interacção entre duas variáveis no modelo de resposta $Desp$ enquanto as outras variáveis se mantêm constantes, no nível zero de referência. Observando os gráficos facilmente se constata que o aparecimento de duas linhas não-paralelas, Figura 3.40b, é indicativo de que o efeito de um factor depende do nível do outro. Assim, no caso da resposta $Desp$, não existe interacção entre a variável A: V_w/V_p e a variável C: Sp/p , Figura 3.40a, mas observa-se a existência de interacção entre a variável C: Sp/p e a variável E: V_{ap} , Figura 3.40b.

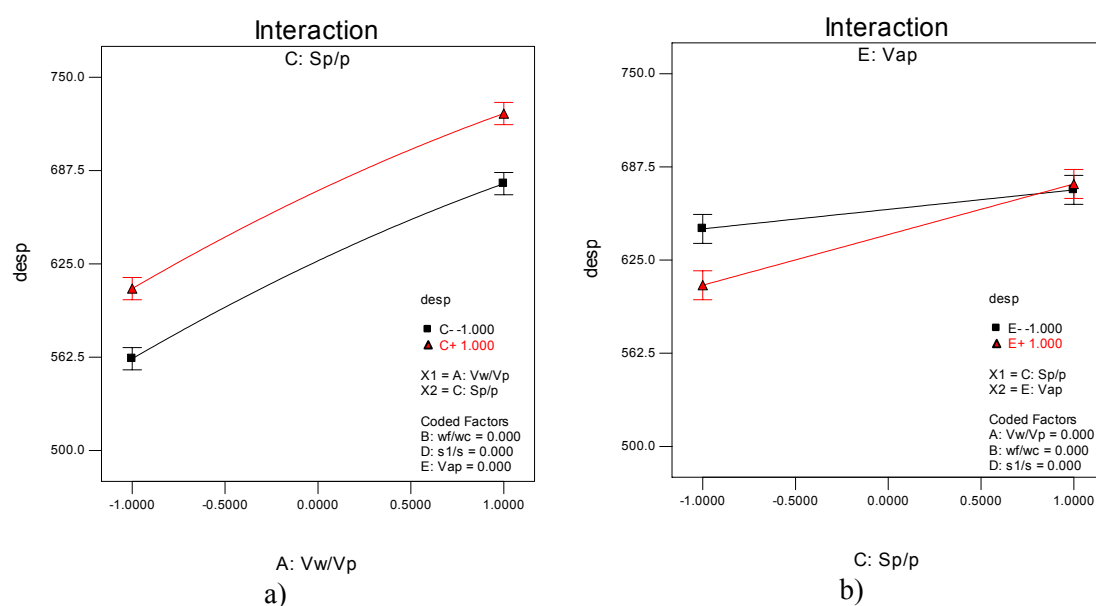


Figura 3.40 – Interacção entre duas variáveis no modelo de resposta $Desp$: a) entre a variável A: V_w/v_p e C: Sp/p , sem interacção; b) entre a variável C: Sp/p e E: V_{ap} , com interacção

Uma outra forma de avaliar a interacção entre variáveis é através das expressões das derivadas parciais dos modelos de resposta relativamente a cada uma das variáveis (Quadro 3.20). Este quadro ilustra claramente o efeito de interacção entre as variáveis, ou seja, quando não há interacção a derivada é constante, caso contrário, a variável de interacção aparece na expressão da derivada. No caso dos termos não-lineares a variação da resposta, introduzida por uma determinada variável, depende do valor da própria variável, ver exemplos na primeira linha do Quadro 3.20.

Quadro 3.20 – Derivadas parciais dos modelos de resposta relativamente a cada uma das variáveis

χ_i	$\frac{\partial \text{Desp}}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial \text{T50}}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial (1/\sqrt{\text{Tfunil}})}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial H}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial \text{fc,28 dias}}{\partial \chi_i}$
V_w / V_p	58.67-13.9 Vw/Vp	-1.291+0.632 Vw/Vp	0.054	8.12 -7.9 Vw/Vp	-3.29
w_f / w_c	8.21	-0.110+0.344 s1/s	0.006-0.009 s1/s	-	-1.11
Sp / p	23.50 +10.44 Vap	-0.355-0.451 Vap	-	2.79+3.44 Vap	1,25 -1.24 Vap
s_1 / s	--	-0.035+0.344 wf/wc	0.004 -0.009 wf/wc	-	1,26
V_{ap}	-8.46 +10.44 Sp/p	0.220-0.451 Sp/p	-	-3.54 +3.44 Sp/p	-0.67-1.24 Sp/p-2.92 Vap

3.3.4.3 Efeito geral dos parâmetros nas variáveis de resposta

No Quadro 3.21 apresentam-se os valores limite que as diversas derivadas parciais assumem na região analisada ($\chi_i \in [-1;1]$). A análise deste quadro permite concluir que, em alguns casos, a introdução de uma variação numa variável conduz a um aumento da resposta numa parte da região analisada e não altera ou diminui a resposta na parte restante, consoante a respectiva derivada parcial assume um valor positivo, nulo ou negativo, respectivamente.

Quadro 3.21 – Valores limite das derivadas parciais na região analisada

$\chi_i \in [-1;1]$	$\frac{\partial \text{Desp}}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial T50}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial (1/\sqrt{T_{\text{funil}}})}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial H}{\partial \chi_i}$	$\frac{\partial f_c, 28 \text{ dias}}{\partial \chi_i}$
V_w / V_p	72.57 a 44.77	-1.923 a -0.659	0.054	16.02 a 0.22	-3.29
w_f / w_c	8.21	-0.454 a 0.234	0.015 a -0.003	--	-1.11
Sp / p	13.06 a 33.94	0.096 a -0.806	--	-0.65 a 6.23	2.49 a 0.01
s_1 / s	--	-0.379 a 0.309	0.013 a -0.005	--	1,26
V_{ap}	-18.9 a 1.98	0.671 a -0.231	--	-6.98 a -0.1	3.49 a -4.83

Nas figuras 3.41 a 3.45 apresentam-se isocurvas e superfícies de resposta, através das quais é igualmente possível observar a alteração nas propriedades do BAC em função das variáveis que intervêm no respectivo modelo, duas a duas, enquanto as restantes se mantêm no nível zero, nível de referência. Quando o efeito de interacção entre duas variáveis é significativo para o modelo, as isocurvas da resposta em função das respectivas variáveis deixam de ser rectas e as superfícies da resposta deixam de ser planas.

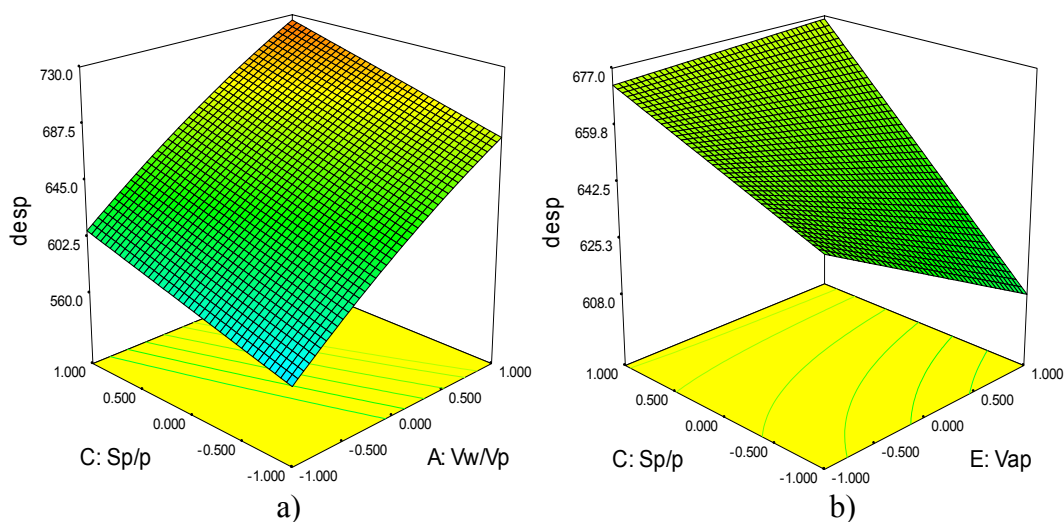


Figura 3.41 – Superfícies de resposta no caso do Desp em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: a) A: V_w/V_p e C: Sp/p ; b) C: Sp/p e E: V_{ap}

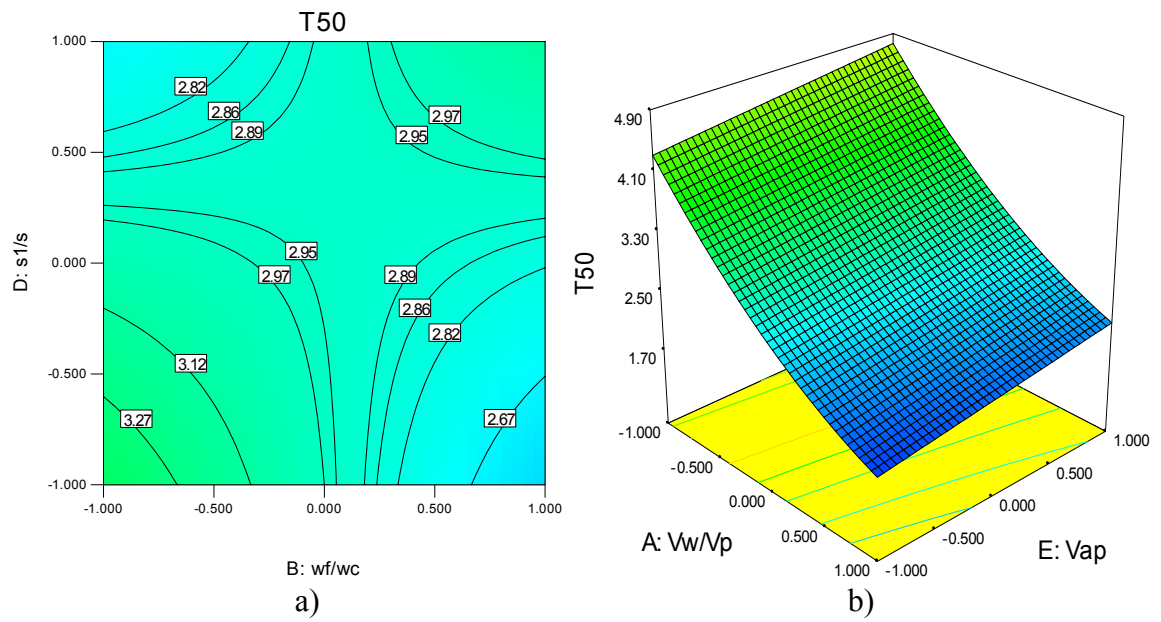


Figura 3.42 – a) Isocurvas da resposta T50 em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: B: w_f/w_c e D: s_1/s ; b) Superfícies de resposta no caso do T50 em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: A: V_w/V_p e E: V_{ap}

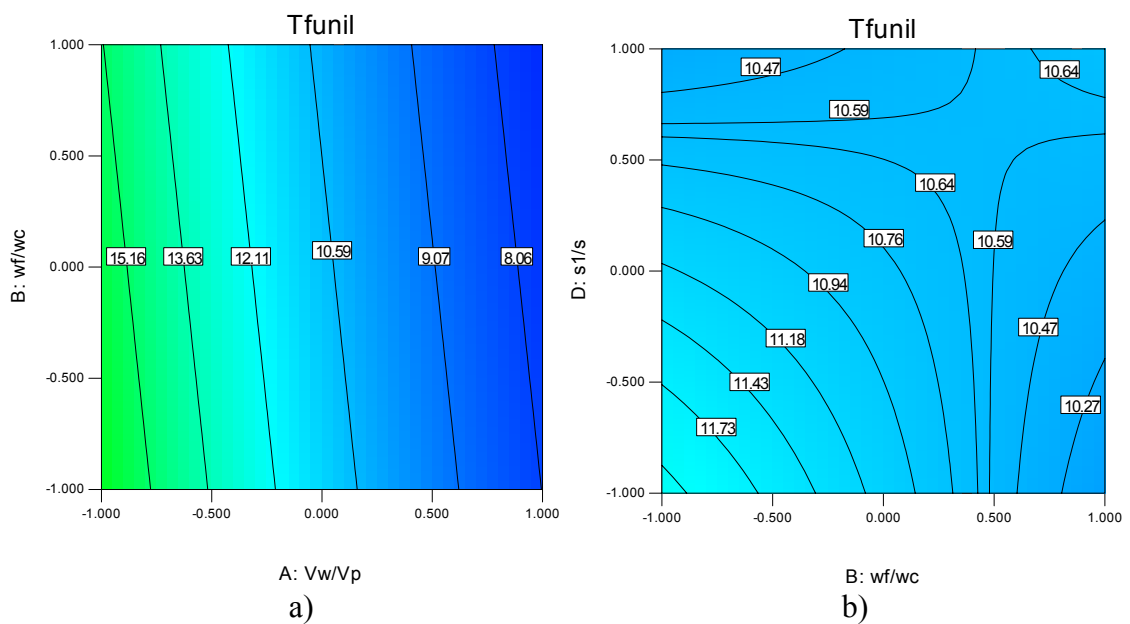


Figura 3.43 – a) Isocurvas da resposta Tfunil em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: a) A: V_w/V_p e B: w_f/w_c ; b) B: w_f/w_c e D: s_1/s

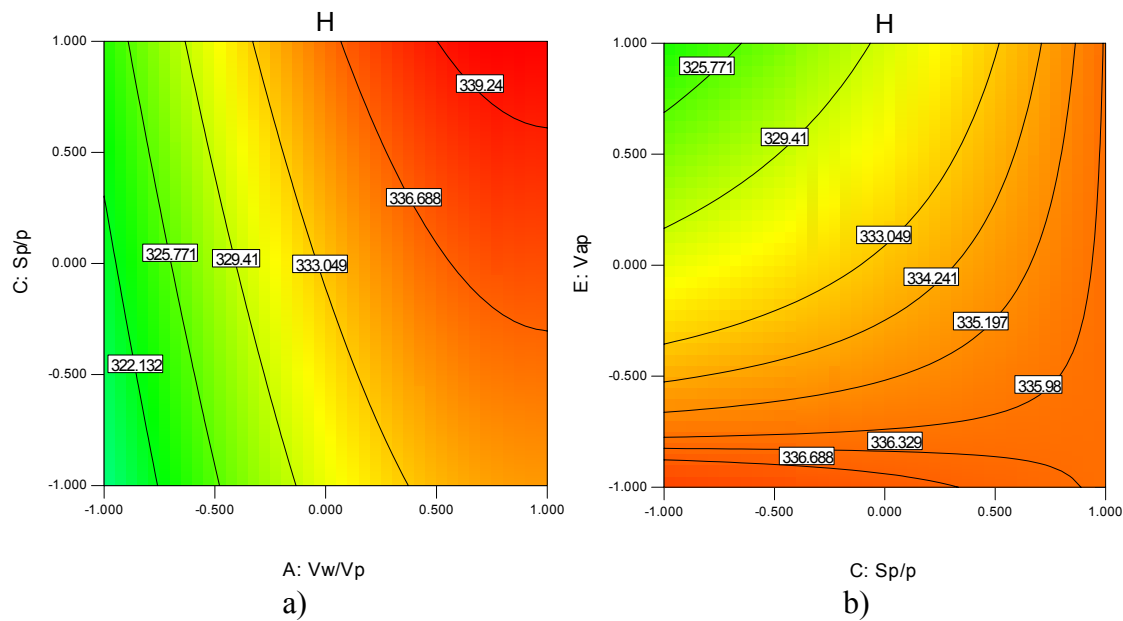


Figura 3.44 – Isocurvas da resposta H em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: a) $A: V_w/V_p$ e $C: S_p/p$; b) $C: S_p/p$ e $E: V_{ap}$

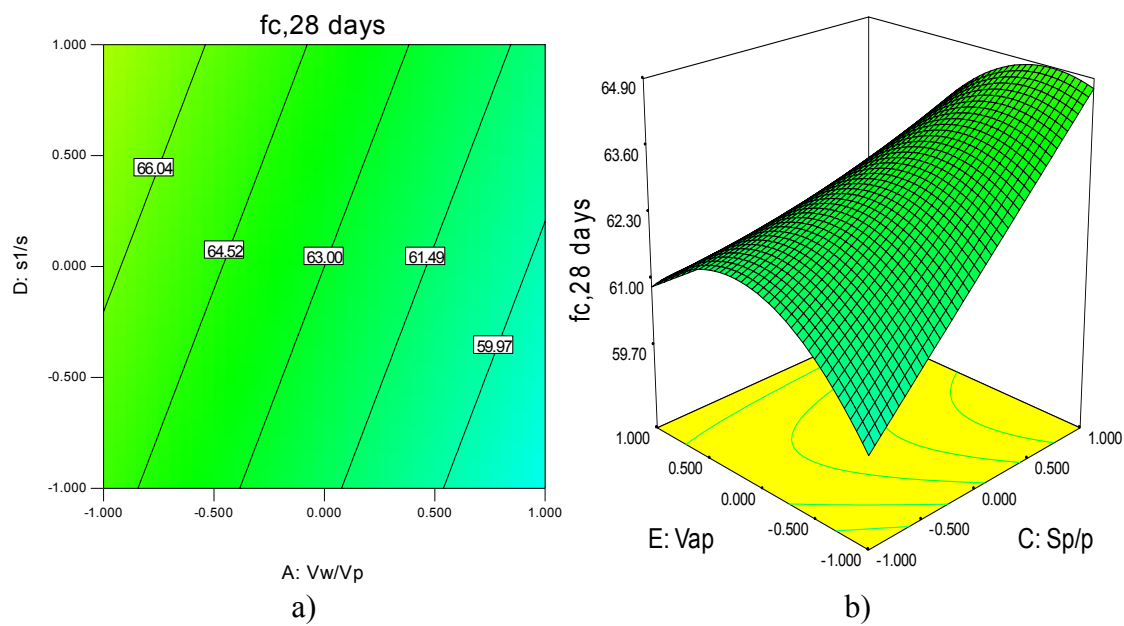


Figura 3.45 – a) Isocurvas da resposta $fc, 28 \text{ dias}$ em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: $A: V_w/V_p$ e $D: s_1/s$; b) Superfície de resposta no caso do $fc, 28 \text{ dias}$ em função de duas das variáveis que intervêm no modelo: $C: S_p/p$ e $E: V_{ap}$

Ao conduzir as experiências segundo um plano factorial são avaliados os efeitos individuais de cada variável e os eventuais efeitos de interacção entre as variáveis. As

principais conclusões que decorreram do programa experimental levado a cabo com os materiais utilizados na composição de Rio Maior, são as seguintes:

Na região analisada,

- a) Em todas as propriedades avaliadas, a variável mais crítica foi claramente V_w/V_p , ou seja, a relação volumétrica água/finos;
- b) Depois de V_w/V_p , as variáveis que mais influenciaram as propriedades do BAC no estado fresco foram Sp/p e V_{ap} ;
- c) As variáveis V_w/V_p , w_f/w_c , Sp/p e V_{ap} influenciaram mais significativamente o diâmetro de espalhamento; um aumento de V_w/V_p , Sp/p e w_f/w_c provocou sempre o aumento do Desp;
- d) As variáveis V_w/V_p , w_f/w_c , Sp/p , s_1/s e V_{ap} influenciaram significativamente o tempo necessário para o BAC atingir um diâmetro de 500mm (T50). Um aumento de V_w/V_p provocou sempre a redução do T50;
- e) As variáveis V_w/V_p , w_f/w_c e s_1/s influenciaram significativamente o tempo necessário para escoar no funil-V. Um aumento de V_w/V_p provocou sempre o aumento do Tfunil;
- f) As variáveis V_w/V_p , Sp/p e V_{ap} influenciaram significativamente a altura de enchimento; um aumento de V_w/V_p provocou sempre o aumento de H;
- g) As variáveis V_w/V_p , w_f/w_c , Sp/p , s_1/s e V_{ap} influenciaram significativamente a resistência à compressão aos 28 dias. Um aumento de V_w/V_p e w_f/w_c provocou sempre a redução de $f_{c,28\text{dias}}$ e um aumento de Sp/p e s_1/s provocou sempre o aumento de $f_{c,28\text{dias}}$;
- h) O efeito da interacção entre w_f/w_c e s_1/s teve algum significado para o T50 e Tfunil;
- i) O efeito da interacção entre Sp/p e V_{ap} teve significado para todas as propriedades analisadas, com excepção do Tfunil;
- j) O termo quadrático $(V_w/V_p)^2$ teve significado nos modelos de Desp, T50 e H;
- k) O termo quadrático $(V_{ap})^2$ teve significado no modelo de $f_{c,28\text{dias}}$.

3.3.5 Discussão e apreciação da metodologia

Ao contrário da generalidade das metodologias, o dimensionamento experimental apoiado na estatística possibilita a concepção de composições de betão auto-compactável de uma forma mais orientada. Este tipo de abordagem permite definir modelos matemáticos que descrevem a influência dos parâmetros da composição nas variáveis de resposta escolhidas, propriedades frescas e endurecidas do BAC. A definição destes modelos exige contudo a realização de um conjunto de experiências, que quando programadas segundo o plano factorial, permitem retirar informação de boa qualidade e abranger a generalidade dos efeitos entre os parâmetros, efeitos isolados e de interacção.

Ao utilizar esta metodologia de dimensionamento, facilmente se podem definir diferentes composições de betão consoante os requisitos de desempenho exigidos. A sua principal limitação reside no facto dos modelos estabelecidos serem válidos apenas para o conjunto de materiais seleccionados, pelo que uma variação na dimensão máxima do agregado grosso ou até mesmo no tipo de superplastificante utilizado, exige a definição de novos modelos.

A aplicação deste tipo de abordagem estatística não se limita ao dimensionamento de composições, podendo ser igualmente utilizada para avaliar a influência de novos materiais na composição, como superplastificantes ou agentes de viscosidade, para comparar parâmetros reológicos com propriedades de auto-compactabilidade do BAC ou para aferir da robustez das composições, à qual se fará referência no Capítulo 5.

CAPÍTULO 4

ENSAIO À ESCALA REAL EM NELAS

4.1 MOTIVAÇÃO

Dada a complexidade e estrutura do sector da construção, não existem dúvidas de que o desenvolvimento do betão auto-compactável tem sido extraordinariamente rápido. Trata-se de uma nova tecnologia cujo mercado cresceu rapidamente, motivado pelas novas oportunidades económicas e melhoramentos na qualidade do betão e no ambiente de trabalho (Skarendahl, 2003). Contudo até agora, em Portugal, muitas composições foram desenvolvidas e testadas em laboratório mas as experiências em produzir BAC *in situ*, a uma escala real, são ainda limitadas.

Na indústria da pré-fabricação a central de fabrico do betão e o local da aplicação estão muito próximos, sendo mais fácil controlar e garantir a qualidade do betão fresco, o que constitui uma vantagem adicional para a introdução, com sucesso, do BAC. Por outro lado, geralmente na pré-fabricação são betonados elementos de geometria complexa e elevada densidade de armadura cuja produção, utilizando o betão tradicional, apenas pode ser realizada mediante grandes restrições, compactação por vibração exterior muito forte, e em alguns casos, exigindo-se a betonagem por fases. A introdução desta nova tecnologia na pré-fabricação permitirá ainda um melhor acabamento final, eliminando a necessidade de efectuar reparações na superfície após a desmoldagem, permitirá também a redução do consumo de energia e uma redução drástica do ruído no interior da fábrica devido à eliminação da vibração e ainda uma melhoria das condições de trabalho visto que as tarefas são aligeiradas.

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas, o sucesso na produção de BAC com características constantes exige uma central de produção com capacidade para controlar e

manter os factores de produção, dos quais os mais críticos são o teor de água e o teor de finos (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005). A pré-fabricação surge como a indústria da construção onde a automação e repetição dos processos permite mais facilmente instalar planos de qualidade para controlo das características dos materiais e dos processos de mistura e transporte.

Visto que a tecnologia do betão auto-compactável se trata ainda de uma novidade sob diferentes aspectos, a abordagem experimental assume uma importância especial, exigindo um contacto mais estreito entre o laboratório e a central de produção. Neste capítulo e no Capítulo 5 serão descritas e avaliadas as experiências realizadas em duas fábricas de pré-fabricação, durante as quais foram aplicadas composições de BAC estudadas previamente em laboratório. Os principais objectivos destas experiências à escala real prendem-se com o desenvolvimento de métodos de produção e colocação aplicáveis ao BAC, e a optimização da organização do processo construtivo por forma a conseguir uma produção mais competitiva e uma diminuição dos custos globais.

Nesta fase pretendeu-se ainda caracterizar e comparar o BAC produzido em fábrica com o betão convencional habitualmente utilizado, no que diz respeito às suas propriedades mecânicas e de durabilidade. O BAC produzido no âmbito dos ensaios à escala real foi caracterizado no estado fresco, recorrendo aos mesmos ensaios utilizados durante o estudo laboratorial prévio permitindo observar as diferenças entre as misturas produzidas no laboratório e nas condições reais de produção.

4.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio à escala real, realizado nas instalações da MAPREL em Nelas, surgiu na sequência dos estudos realizados em laboratório, apresentados na secção 3.2.3. Para esta experiência seleccionou-se um troço com cerca de 2.5m de uma viga-caixão, troço esse correspondente à zona de ancoragem dos cabos de pré-esforço, onde o espaçamento entre as armaduras é bastante reduzido, sendo as condições de betonagem bastante mais exigentes. As dimensões e o aspecto do elemento ensaiado apresentam-se na Figura 4.1a. Na Figura 4.1b pode-se observar a montagem das armaduras no troço de elemento a betonar e na Figura 4.2 a densidade de armadura do troço de elemento betonado.

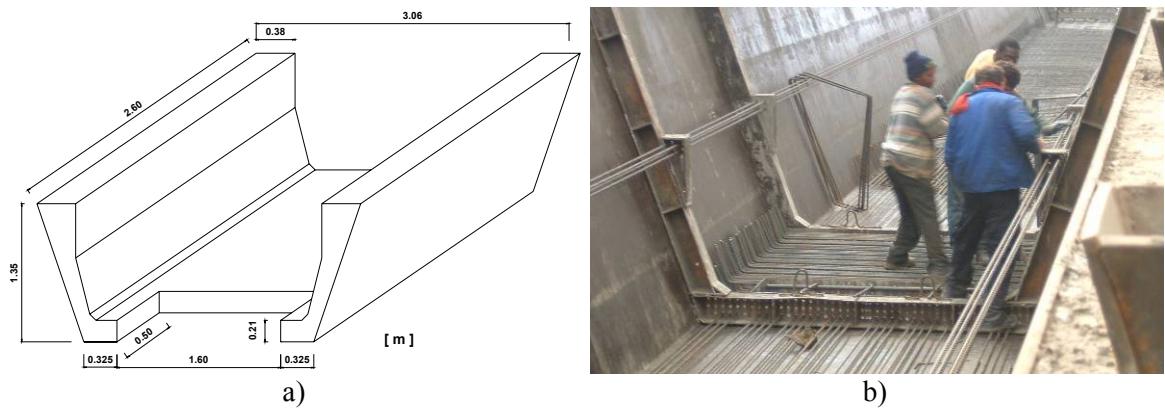


Figura 4.1 – a) Dimensões da viga-caixão betonada no ensaio à escala real; b) Preparação das armaduras no troço de elemento a betonar



Figura 4.2 – Aspecto final das armaduras no troço do elemento a betonar

O ensaio foi conduzido nas condições normais de funcionamento da fábrica, com exceção da vibração. Devido ao esquema de cofragem existente, cofragem exterior contínua e cofragem interior deslizante apenas na zona das almas, a betonagem do referido elemento foi realizada em duas fases. Numa primeira fase foi betonada a laje inferior, o banzo da viga caixão, e só depois as paredes laterais, as almas. Entre as duas fases foi necessário esperar cerca de 6 horas para que o betão do banzo adquirisse resistência suficiente, permitindo desta forma betonar as almas. O transporte do betão desde a misturadora até ao local da betonagem foi realizado por uma máquina transportadora específica, e a descarga fez-se através de uma haste do veículo contendo um “parafuso sem fim”. A descarga foi realizada lançando o betão de uma altura de cerca de 2m através da extremidade do “parafuso sem fim” para o interior da cofragem.

Apesar da dificuldade em realizar um grande número de ensaios, os resultados dos ensaios de espalhamento e de fluidez, das diferentes amassaduras, permitiram concluir que as características do BAC fresco ensaiado no laboratório foram reproduzidas na fábrica. A Figura 4.3 apresenta o aspecto da viga-caixão após a descofragem. Depois de descofrar a viga foi possível verificar que esta ficou completamente cheia, aparentemente sem vazios interiores e com as armaduras completamente envolvidas. A superfície apresentou-se livre de bolhas de ar, à excepção da parte interna das paredes laterais onde são visíveis algumas cavidades correspondentes a bolhas de ar que não conseguiram chegar à superfície livre (Figura 4.4a). Na Figura 4.4b, é possível observar na parte externa das paredes laterais a junta de betonagem resultante do facto da betonagem ter sido realizada em duas fases.

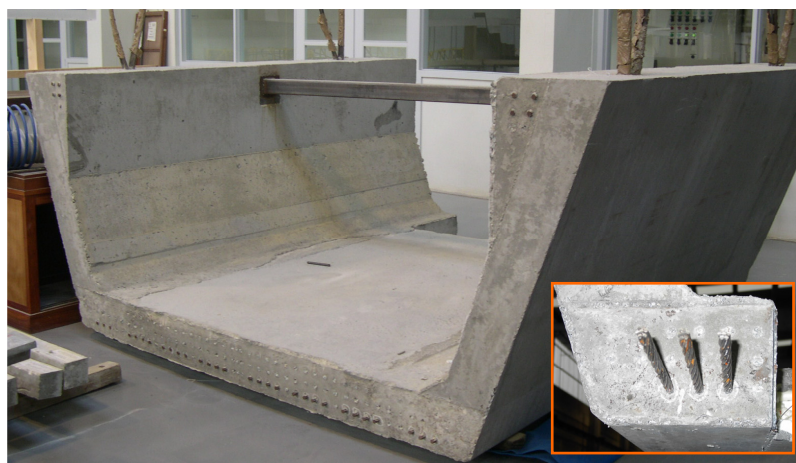


Figura 4.3 – Aspecto da viga-caixão depois da descofragem



a)



b)

Figura 4.4 – a) Aspecto das paredes laterais internas da viga-caixão depois da descofragem; b) Aspecto das paredes laterais externas da viga-caixão depois da descofragem

4.3 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Durante a realização deste ensaio à escala real, realizado nas condições normais de funcionamento da fábrica, foram sentidas algumas dificuldades. Na fábrica de Nelas os agregados, antes de serem colocados nos respectivos silos, são mantidos no exterior das instalações da fábrica e portanto sujeitos às variações climáticas. Por consequência, o teor de humidade dos agregados sofre variações significativas obrigando a correcções frequentes das composições teóricas. Atendendo a que as propriedades do BAC enquanto fresco são mais afectadas por variações da composição do que o betão convencional, a precisão na determinação do teor de humidade dos agregados e na pesagem dos materiais na central deverá ser maior.

Por outro lado a fábrica possui um silo próprio para armazenar o cimento e o superplastificante, o mesmo não sucedendo com o fíler calcário, previsto na composição de BAC, mas que não é utilizado nas composições de betão convencional produzidas. Este facto representou uma dificuldade acrescida e a forma encontrada para a ultrapassar foi a pesagem manual do fíler calcário e a sua introdução directa no tambor da misturadora através da janela de observação.

Uma outra dificuldade prendeu-se com a forma como foi realizada a betonagem da peça, a descarga do betão foi realizada lançando o betão de uma altura de cerca de 2m através da extremidade de um “parafuso sem fim” para o interior da cofragem. O facto do betão ser lançado de uma altura de 2m sem que seja utilizada qualquer tipo de manga flexível, promove a introdução de ar no betão e propicia a separação dos agregados (Figura 4.5a).



a)



b)

Figura 4.5 – a) Aspecto da forma de betonagem; b) Cofragem da viga-caixão

O esquema de cofragem existente, ver Figura 4.5b, cofragem exterior contínua e cofragem interior deslizante apenas na zona das almas, encontra-se bem adequado ao uso do betão convencional (betão com necessidade de vibração). Contudo, a utilização de BAC na execução destas peças permitiria usar uma cofragem totalmente fechada e contínua, tornando, desta forma, a betonagem num processo contínuo e portanto mais económico.

4.4 PROPRIEDADES ENDURECIDAS DO BAC E DO BC

Aquando da experiência na fábrica da MAPREL, em Nelas, realizou-se uma amostragem do betão auto-compactável (BAC-M), para posterior caracterização em laboratório e, de forma semelhante, no dia seguinte procedeu-se a uma amostragem do betão convencional (BC-M) habitualmente usado para betonar as vigas-caixão. No Quadro 4.1 apresentam-se as composições do betão convencional e do betão auto-compactável utilizadas.

Quadro 4.1 – Composições do betão convencional e do betão auto-compactável

Composição		Betão Auto-Compactável (BAC)	Betão Convencional (BC)
cimento (CEM I 52.5R)	kg/m ³	380	380
fíler calcário (Micro100)		114	--
areia 1		534	375
areia 2		375	592
brita		704	832
água		175	168
superplastificante (V3000)		9.88	6.30
água/cimento (w/c)		0.46	0.44
água/total finos (w/p)		0.35	0.44
custo relativo dos materiais		110%	100%

Como principais diferenças aponta-se o facto da composição de betão convencional conter menos finos, uma vez que não inclui fíler calcário, possui uma quantidade de agregados maior, em particular agregado grosso, e menos superplastificante. O conteúdo em agregado grosso é bastante menor no BAC do que no betão convencional, por forma a reduzir o risco de bloqueio do fluxo de betão através das zonas mais densamente armadas e nas aberturas mais apertadas da cofragem (Zhu e Bartos, 2003). Estas diferenças nos materiais repercutem-se nos custos totais dos materiais, apresentando o betão auto-

compactável um custo 10% superior ao do betão convencional. Contudo, dadas as diferenças existentes nas proporções da mistura e também nos processos de colocação e compactação, não é certo que o BAC possua as mesmas características mecânicas e de durabilidade do betão convencional.

Três dias após a betonagem, os provetes foram transportados para a FEUP onde foram ensaiados, a diferentes idades. Estas duas amostragens foram ainda comparadas com as características da mesma composição de BAC produzido previamente no laboratório da FEUP (BAC-F). Tendo em vista a caracterização e comparação das características mecânicas e de durabilidade do betão endurecido das composições BAC-F, BAC-M e BC-M, foi realizado um conjunto de ensaios a diferentes idades.

Todos os provetes da composição BAC-F permaneceram durante 24 horas à temperatura ambiente e, em seguida, foram desmoldados e colocados numa câmara de cura a $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa de $99\%\pm 1\%$, à excepção dos prismas de retracção e fluência que foram colocados numa câmara a $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e a $50\%\pm 5\%$ de humidade. Os provetes das composições BAC-M e BC-M permaneceram durante 3 dias à temperatura da fábrica, cuja temperatura média rondava os 10°C e, em seguida foram transportados para a FEUP, desmoldados e colocados numa câmara de cura a $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa de $99\%\pm 1\%$. Quatro dos provetes da composição BAC-M foram desmoldados na fábrica e ensaiados com 1 dia de idade para determinação da sua resistência à compressão.

4.4.1 Aferição e comparação das propriedades mecânicas

Dadas as claras diferenças existentes entre o betão auto-compactável e o betão convencional, essencialmente no que diz respeito às proporções da mistura e aos processos de colocação e transporte, é importante verificar até que ponto as propriedades endurecidas destes betões poderão diferir (Klug e Holschemacher, 2003). As possíveis diferenças nas propriedades mecânicas e de durabilidade poderão ser justificadas pelas modificações na composição, tal como mencionado anteriormente, pela melhor microestrutura e homogeneidade exibida pelo BAC, mas também pela eliminação da vibração.

A maior quantidade em materiais ultrafinos e o correspondente menor conteúdo de agregados grossos exibido pelo BAC, modifica o esqueleto granular, o que pode influenciar tanto a resistência como o módulo de elasticidade do betão. Além disso a adição de alguns finos dá lugar a diferentes reacções com a água e a utilização de

superplastificante faz com que as necessidades de água da composição se alterem (Klug e Holschemacher, 2003).

Por outro lado, fruto do aumento da quantidade de finos (cimento, filler) no BAC, a granulometria das partículas será mais extensa e o seu empacotamento melhorado. A melhor microestrutura da pasta e a sua maior fluidez promovem uma diminuição da porosidade da zona interfacial de transição entre os agregados e a pasta de cimento. Consequentemente a tensão de tracção do BAC será potencialmente maior quando comparado com o betão convencional, uma vez que as forças de tracção dependem fundamentalmente da adesão da matriz cimentícia aos agregados.

4.4.1.1 Resistência à compressão

Os ensaios de rotura à compressão foram realizados segundo o procedimento descrito nas normas NP EN 12390-3 (2003) e NP EN 12390-4 (2003), embora com ligeiras alterações no que diz respeito à forma como se procedeu à aplicação da carga. A carga aplicada foi controlada por uma progressão de deslocamentos constantes, 0.1mm/s até ajuste dos pratos da prensa e para uma carga de 2kN, na fase posterior a carga foi aplicada com uma velocidade constante de 0.02mm/s. A Figura 4.6a apresenta um provete cúbico após o ensaio de rotura à compressão simples e na Figura 4.6b exemplificam-se as curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de compressão até à rotura de três provetes cúbicos, aos 7 dias da composição BAC-F.

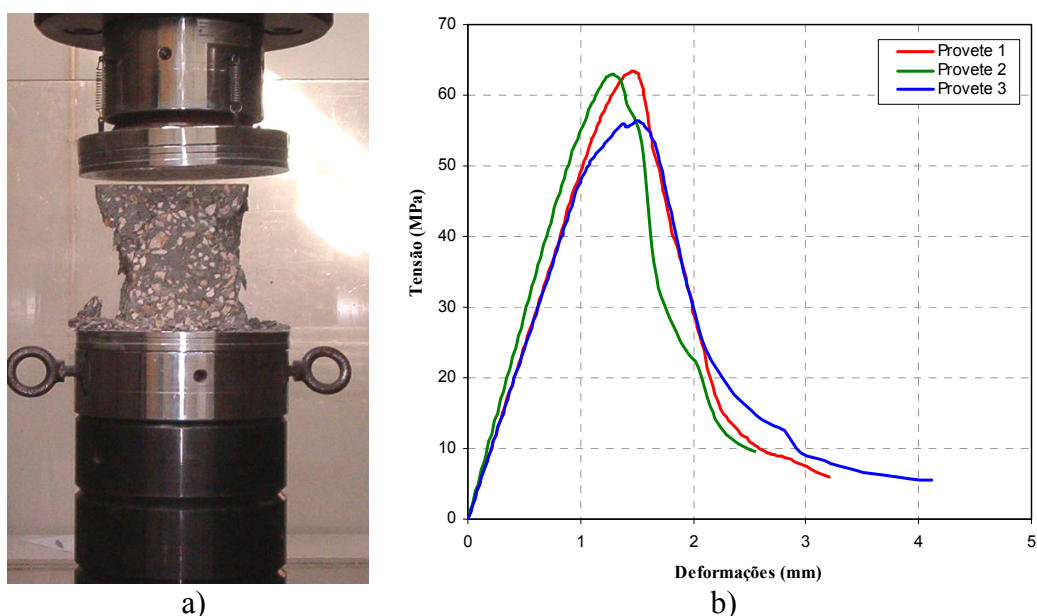


Figura 4.6 – a) Aspecto de um provete cúbico após o ensaio de rotura à compressão; b) Curvas de tensão – deformação no ensaio de rotura à compressão

No Quadro 4.2 apresentam-se a massa volúmica do betão endurecido e os resultados da tensão de rotura à compressão, obtidos em cubos a diferentes idades. No mesmo quadro apresenta-se o respectivo coeficiente de variação e o valor característico da tensão de rotura definido segundo o critério 1 da NP EN 206-1 (2005).

Quadro 4.2 – Resultados do ensaio à rotura por compressão simples dos provetes cúbicos

	Idade do ensaio	Nº de provetes	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$f_{\text{cm, cubos}}$ (MPa)	Coef. Var (δ)	$f_{\text{ck, cubos}}^{\text{a)}}$ (MPa)
BAC-F	1 dia	3 cubos	2398.4	43.4	6.1%	39.4
	2 dias	3 cubos	2400.4	47.6	6.6%	43.6
	7 dias	3 cubos	2418.0	60.9	6.4%	56.0
	14 dias	3 cubos	2408.2	65.2	6.1%	61.2
	28 dias	4 cubos	2404.2	67.1	3.6%	63.1
BAC-M	1 dia	4 cubos	2354.7	27.9	11.8%	23.9
	4 dias	3 cubos	2337.8	51.9	8.8%	47.9
	7 dias	3 cubos	2332.6	54.8	8.8%	50.8
	14 dias	3 cubos	2373.3	67.5	2.6%	63.5
	28 dias	3 cubos	2357.7	70.8	6.7%	66.5
BC-M	1 dias	-	-	-	-	-
	4 dias	-	-	-	-	-
	7 dias	3 cubos	2417.7	53.2	2.2%	49.2
	14 dias	-	-	-	-	-
	28 dias	3 cubos	2422.0	66.2	6.2%	62.2

a) f_{ck} . Definido segundo o critério 1 da NP EN 206-1: $f_{\text{cm}} \geq f_{\text{ck}} + 4$

Em média, a massa volúmica do BAC produzido na FEUP foi de 2405kg/m³, a do BAC produzido na MAPREL de 2350 kg/m³ e a do betão convencional de 2420 kg/m³. O facto da massa volúmica do BC ser superior à do BAC prende-se essencialmente com a maior quantidade de agregado grosso presente na sua composição. Comparando os valores da resistência obtidos no BAC-M com os obtidos no BAC-F verifica-se que existe uma boa correspondência para as idades de 14 e 28 dias. Nas primeiras idades de ensaio, especialmente no ensaio realizado às 24h, o valor da tensão de rotura foi menor no BAC-M, isto porque os provetes foram mantidos no ambiente da fábrica até aos 3 dias de idade. As baixas temperaturas verificadas no local da fábrica durante esses dias terão potenciado a que a evolução da resistência nas primeiras idades fosse francamente diferente. No que respeita ao betão convencional os resultados obtidos, para os 7 e 28 dias, foram semelhantes mas ligeiramente inferiores aos do BAC, provavelmente devido ao valor ligeiramente mais alto da razão w/p do BC.

A resistência à compressão é função das razões água/cimento e água/finos, mas também do volume de vazios e da resistência da ligação cimento-agregado, que depende de numerosos factores, como das afinidades químicas ou da textura da superfície. A maior compacidade das composições de BAC, promovida pela utilização de um maior conteúdo em finos, a melhor ligação entre a matriz cimentícia e o agregado e as baixas relações água/finos exibidas pelas composições de BAC, repercute-se de forma favorável na resistência à compressão. Estudos desenvolvidos por diversos autores, (Pineaud, Cabrillac *et al.*, 2005) e (Larrard e Roy, 1992), e à semelhança do que acontece com o betão convencional, apontam para o facto do volume de pasta da composição ter um efeito diminuto na resistência à compressão e que por outro lado a razão água/finos representa uma forte influência na resistência do betão auto-compactável.

A resistência à compressão, uma das propriedades mais importantes do betão endurecido, constitui geralmente a característica do material que o classifica nas regulamentações nacionais e internacionais. Por esta razão, a identificação das diferenças na resistência à compressão final e na forma como esta evolui ao longo do tempo são importantes quer na classificação do material como na utilização das expressões de dimensionamento das estruturas. Perante os resultados apresentados poder-se-á dizer que ambos os BAC e o betão convencional pertencem à classe C50/60. Relativamente a possíveis diferenças quanto à forma como a resistência evolui ao longo do tempo, não existem resultados suficientes que permitam tirar conclusões.

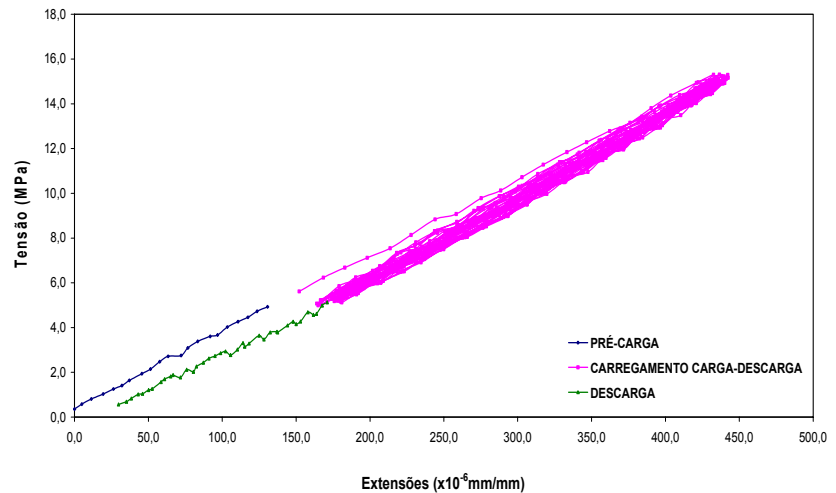
4.4.1.2 Módulo de elasticidade

Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade em compressão foram realizados segundo o procedimento descrito na especificação do LNEC E397 (1993). Para a realização deste ensaio foram utilizados provetes cilíndricos com um diâmetro de 0.15m e uma altura de 0.30m (Figura 4.7a). A medição das variações de comprimento foram realizadas mediante a utilização de um dispositivo composto por dois anéis independentes que servem de suporte a três LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers) colocados ao longo do perímetro do cilindro com uma base de medida de 0.10m e situados no terço central do provete (Figura 4.7a). O ensaio consiste em 20 ciclos de carga e descarga variando entre 1/10 e 1/3 da tensão de rotura à compressão simples, a uma velocidade média de 0.16MPa/s. No gráfico da Figura 4.7b apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio realizado aos 7 dias num provete de BAC-F, onde é visível a fase de pré-carga, uma fase de carga e descarga entre os níveis acima mencionados e uma fase de descarga. No cálculo do módulo de elasticidade não são considerados os cinco primeiros

ciclos de carga-descarga, isto porque no início ocorre um rearranjo das partículas de betão e a adaptação do próprio mecanismo de ensaio ao provete.



a)



b)

Figura 4.7 – a) Provete cilíndrico durante o ensaio para determinação do módulo de elasticidade;
b) Tipo de carregamento utilizado na determinação do módulo de elasticidade

Observando o Quadro 4.3, onde são apresentados os resultados do módulo de elasticidade avaliado em provetes de BAC e betão convencional, verifica-se que o valor obtido para o betão convencional é ligeiramente superior ao obtido nos provetes de BAC. O valor desta propriedade mecânica do betão aumenta para maiores volumes de agregado grosso e diminui com o aumento do conteúdo em finos, pelo que é plausível encontrar valores mais baixos do módulo de elasticidade no betão auto-compactável. Comparando o BAC-M e BC-M, composições produzidas nas mesmas condições de amassadura e cura, verifica-se que o módulo de elasticidade do BAC foi ligeiramente inferior ao do betão convencional, aos 28 dias de idade.

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade

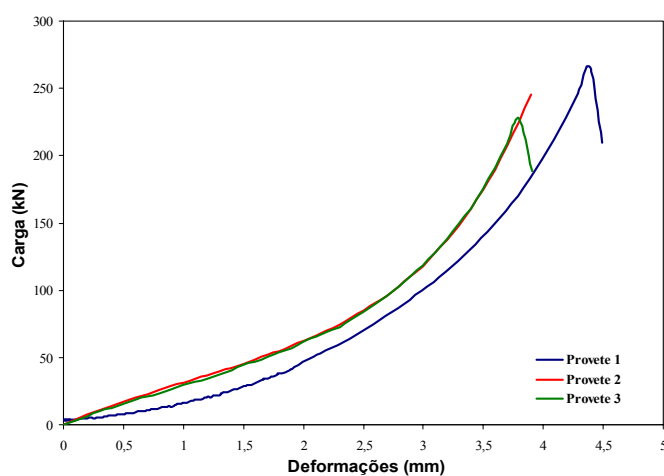
	Idade do ensaio	Nº de provetes	E_{cm} (GPa)	Coef. Var (δ)
BAC-F	6 dias	1 cilindro	35.9	-
	23 dias	1 cilindro	36.7	-
	28 dias	3 cilindros	37.2	2.8%
BAC-M	7 dias	3 cilindros	32.9	1.8%
	28 dias	3 cilindros	35.9	0.5%
BC-M	7 dias	3 cilindros	32.3	2.4%
	28 dias	2 cilindros	37.6	-

4.4.1.3 Resistência à tracção

A resistência à tracção foi determinada, de forma indirecta, aos 7 e 28 dias por compressão linear de cilindros de 0.30m de altura e 0.15m de diâmetro, seguindo a norma NP EN 12390-6 (2003). O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniformemente distribuída ao longo de duas geratrizes opostas de um cilindro, carga essa que é aplicada com uma velocidade constante até à rotura. Para materializar a aplicação da carga uniformemente distribuída é utilizada uma estrutura metálica rígida como ilustra a Figura 4.8a. Na Figura 4.8b exemplificam-se o tipo de diagramas que é possível obter ao longo deste ensaio.



a)



b)

Figura 4.8 – a) Esquema do ensaio de rotura por compressão diametral; b) Evolução da carga aplicada durante o ensaio de rotura por compressão diametral

No Quadro 4.4 apresentam-se os valores da massa volúmica dos cilindros ensaiados, o valor médio da força máxima atingida durante o ensaio ($F_{\text{máx}}$), o valor médio da tensão de rotura por compressão diametral e o respectivo coeficiente de variação para cada uma das idades de ensaio.

Quadro 4.4 – Resultados do ensaio de rotura por compressão diametral

	Idade do ensaio	Nº de provetes	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$F_{\text{máx}}$ (MPa)	$f_{\text{ct,spli}}$ (MPa)	Coef. Var (%)
BAC-F	7 dias	3 cilindros	2377.8	281.4	4.7	4.1%
	28 dias	-	-	-	-	-
BAC-M	7 dias	3 cilindros	2338.0	334.8	4.8	4.0%
	28 dias	2 cilindros	2335.7	357.4	5.1	--
BC-M	7 dias	3 cilindros	2380.7	285.7	4.1	4.1%
	28 dias	-	-	-	-	-

Todos os parâmetros que influenciam as características da microestrutura da matriz cimentícia e a zona de interface com os agregados são decisivos no comportamento do betão à tracção. Observando os resultados apresentados no quadro anterior verifica-se que a resistência à tracção do BAC produzido na FEUP e na MAPREL aos 7 dias é sensivelmente a mesma e cerca de 20% superior à obtida com o betão convencional. A maior resistência à tracção exibida pelas composições de BAC deve-se presumivelmente à sua melhor microestrutura, resultante de um maior conteúdo em finos. Poros mais pequenos e mais distribuídos permitem uma melhor transferência de forças entre a matriz e os agregados, originando maior resistência à tracção.

4.4.1.4 Fluência e retracção

O estudo da fluência e retracção é importante para clarificar as questões relacionadas com o comportamento reológico dos materiais de modo a obter uma informação mais precisa acerca do tempo de vida da estrutura. A retracção e a fluência conduzem a uma variação das extensões do betão, e encontram-se relacionadas entre si por dependerem fundamentalmente dos mesmos factores, como a composição do betão, as dimensões da peça e a humidade ambiente. De um modo geral, dizemos que a fluência representa a

parcela da deformação a carga constante, dependente desta, enquanto que a retracção representa a parcela da deformação a carga constante, independente da carga. Quando se sujeita uma peça de betão a uma tensão constante com carácter de permanência verifica-se que a sua deformação instantânea aumenta progressivamente com o tempo de aplicação, este fenómeno designa-se por fluência. A variação das dimensões das peças de betão que se verifica desde o final da betonagem até ao estado limite de equilíbrio com o ambiente, a temperatura constante e na ausência de qualquer tensão aplicada, pode traduzir uma retracção ou uma expansão. A retracção, em particular, é definida como a diminuição de dimensões provocada numa fase inicial pelas reacções químicas e numa fase subsequente provocada essencialmente por secagem (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Os ensaios de fluência e retracção realizados neste estudo seguiram em parte as especificações do LNEC E398 (1993) e E399 (1993), respectivamente. As deformações devidas à retracção foram avaliadas em prismas com uma secção de $0.15 \times 0.15\text{m}$ e um comprimento de 0.55m , usando extensómetros eléctricos de embeber no betão. Num dos prismas de retracção betonados com BAC produzido na FEUP, além da medição de extensões foram registadas as temperaturas no interior com o auxílio de um sensor de temperatura (Figura 4.9).

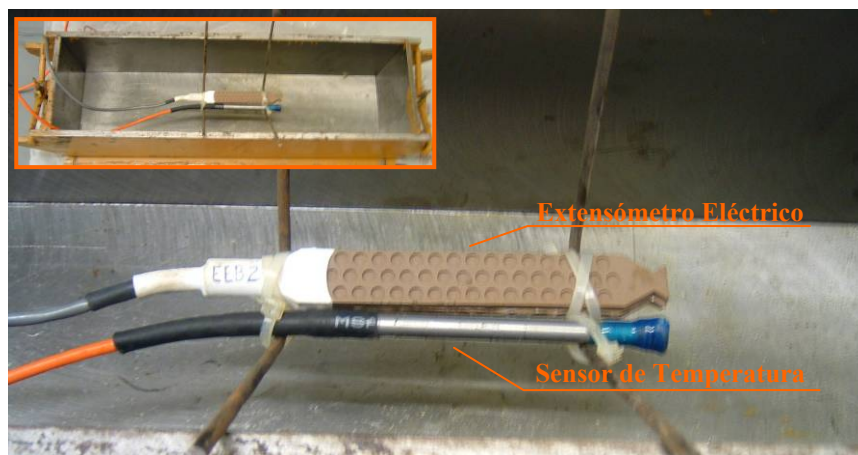


Figura 4.9 – Extensómetro eléctrico e termómetro colocado no prisma de retracção

A libertação de calor durante a hidratação do cimento *Portland* pode ser dividida em três períodos distintos, com diferenças a nível do calor libertado mas também do tipo de reagentes envolvidos e velocidade desses reacções (Maekawa, Chaube *et al.*, 1999). O comportamento térmico de um betão durante o processo de hidratação, em termos de calor libertado, depende fundamentalmente da quantidade e tipo de cimento utilizado.

Dado que nas composições de BAC e BC em estudo se utilizou a mesma quantidade e tipo de cimento, será de esperar que ambas as misturas apresentem um comportamento semelhante relativamente ao calor libertado durante a hidratação. Na Figura 4.10 é possível observar, para a composição de BAC, o final da fase dormente, que na generalidade dos casos dura cerca de 5 horas e o período intermédio com duração de 24 a 48 horas.

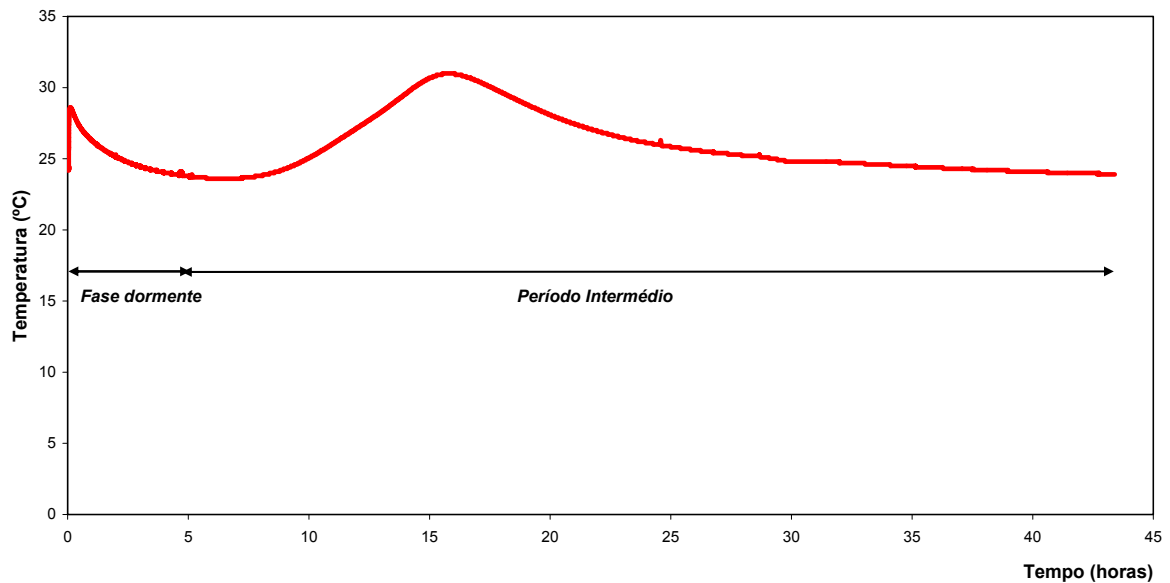


Figura 4.10 – Evolução da temperatura num prisma de BAC durante as primeiras hora

Para avaliar a fluência foram utilizados prismas de igual secção mas com um comprimento de 0.45m, dentro dos quais foi colocado um extensómetro de resistência eléctrica. A tensão aplicada aos prismas correspondeu a cerca de 1/3 da tensão de rotura à data de aplicação da mesma, que neste caso correspondeu a 12MPa. O esquema de aplicação da carga, utilizado para submeter os prismas a uma tensão constante durante o decorrer do ensaio, consistiu essencialmente em duas prensas que têm acoplado a si uma botija de azoto e um manómetro que permite regular a pressão que se pretende aplicar (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Ensaio de fluência no prisma de BAC-M e no prisma de BC-M

Nas figuras seguintes são apresentadas as deformações devidas à retracção ocorridas em dois prismas betonados com a composição BAC-F, Figura 4.12, e num prisma betonado com BAC-M e outro com BC-M, Figura 4.13. Em ambos os gráficos é possível observar a curva de retracção teórica, segundo as expressões preconizada pelo EN 1992-1-1 (2004). Os parâmetros utilizados para traçar as referidas curvas apresentam-se no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Parâmetros utilizados para traçar as curvas teóricas de retracção e fluência segundo as expressões preconizadas no EN 1992-1-1 (2004)

Parâmetros	Retracção BAC – F	Fluência BAC – F	Retracção BAC – M	Retracção BC – M
f_{cm}	53.6MPa	53.6MPa	56.5MPa	52.9MPa
σ_c	-	15.0MPa	-	-
E_{c0}	-	35.7GPa	-	-
RH	50%	50%	50%	50%
h_0	75.0mm	75.0mm	75.0mm	75.0mm
t_0	-	2dias	-	-
t_s	2 dias	-	4 dias	3 dias
α	-	0.20	-	-

Onde f_{cm} é resistência média à compressão do betão aos 28 dias de idade (MPa), σ_c representa o valor da tensão de compressão instalada no prisma para o ensaio de fluência (MPa), E_{c0} é o módulo de elasticidade tangente à idade t_0 (GPa), RH a humidade relativa do meio ambiente (%), h_0 corresponde à espessura equivalente do elemento (mm), t é a idade do betão na data considerada (dias), t_0 é a idade do betão à data do carregamento (dias), t_s é a idade do betão no início da retracção ou expansão (dias) e α representa um expoente função do tipo de cimento.

A medição das deformações por parte dos extensómetros de resistência eléctrica colocados no interior dos dois prismas betonados com BAC-F, iniciaram-se 2 dias após a betonagem, prolongando-se até sensivelmente aos 4 meses. Durante esses 2 dias os referidos prismas foram mantidos no interior dos moldes e cobertos com um plástico numa câmara a $T=20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e $HR=50\% \pm 5\%$. Apesar de se poder considerar que durante este tempo não existiu retracção por secagem, ocorreu a chamada retracção autógena. Através das expressões preconizadas no EN 1992-1-1 (2004) é possível determinar o valor das deformações devidas a esta retracção para a idade de início das medições, que no caso do BAC-F era de 26.9×10^{-6} m/m. Assim, as curvas apresentadas no gráfico seguinte iniciam-se para a idade $t=2$ dias com uma ripagem correspondente ao respectivo valor da retracção autógena.

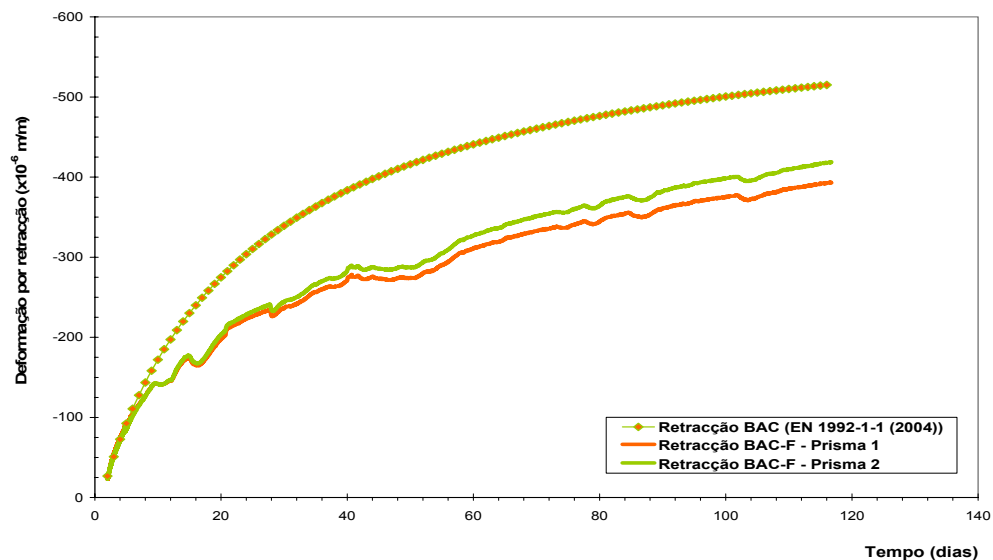


Figura 4.12 – Evolução ao longo do tempo das deformações por retracção

Os prismas moldados na fábrica da MAPREL, um prisma de BAC-M e outro de BC-M, foram mantidos no interior dos moldes e cobertos com um plástico à temperatura ambiente até aos 4 e 3 dias, respectivamente, idade em que foram desmoldados, colocados

numa câmara a $T=20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\%\pm 5\%$ e iniciada a leitura dos extensómetros, Figura 4.13. Tal como sucedeu no gráfico anterior, as curvas de retracção dos prismas de BAC e BC foram ripadas, correspondendo o seu valor inicial à respectiva retracção autógena a quando do início das medições, 40.0×10^{-6} m/m e 33.4×10^{-6} m/m respectivamente.

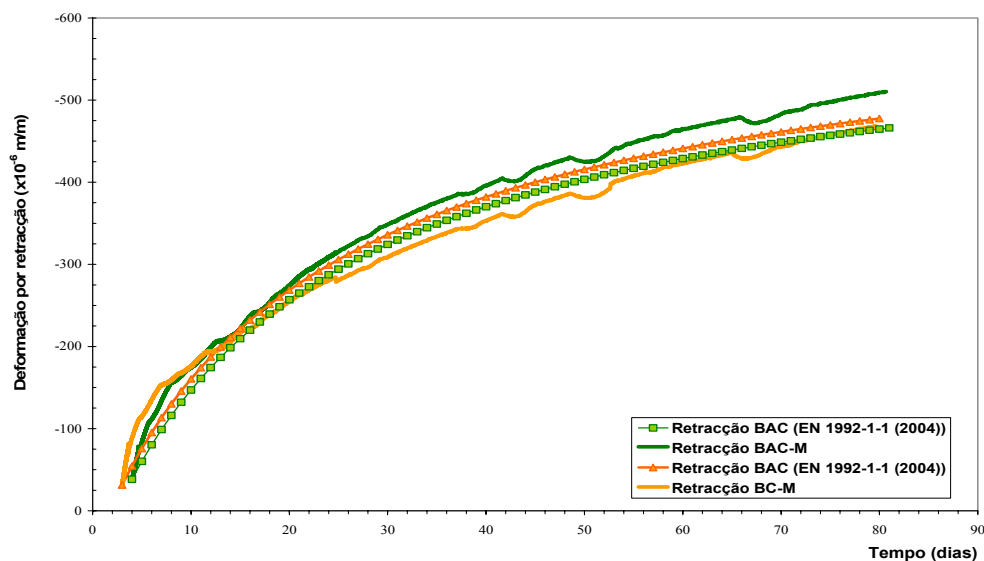


Figura 4.13 – Evolução ao longo do tempo das deformações por retracção

Observando as curvas da Figura 4.13, verifica-se que ambas as composições apresentam deformações por retracção muito semelhantes, com o BAC a exibir valores ligeiramente superiores. As curvas teóricas, traçadas a partir das expressões preconizadas pelo EN 1992-1-1 (2004), parecem retratar bem o comportamento destes dois betões à retracção. Contudo a retracção observada nos prismas de BAC moldados na FEUP, Figura 4.12, apresenta deformações relativamente mais baixas que as observadas nos prismas betonados na MAPREL e que as obtidas por aplicação das expressões do EN 1992-1-1 (2004). Durante o período em que foram medidas as deformações nos prismas de retracção BAC-F observaram-se alguns problemas na câmara climática em que estavam inseridos, pelo que se supõe ser uma das causas para a discrepância de valores observada.

A alteração na combinação de agregados, especialmente na relação entre agregado grosso e agregado fino, assim como a finura e o conteúdo em finos, parece influenciar as deformações devido à retracção. As deformações por retracção de um BAC podem aumentar quando associadas a uma composição de baixo conteúdo em agregado grosso e

um mínimo de volume de pasta, indispensável para assegurar a auto-compactabilidade sem segregação. Apesar disso, podemos encontrar no BAC uma microestrutura da pasta mais densa, resultante da utilização de adições com uma granulometria mais extensa que o cimento, o que afecta de forma positiva a retracção. Sendo assim, será possível modificar a composição de BAC de tal forma que as deformações devido à retracção sejam pequenas, similares às do betão convencional (Klug e Holschemacher, 2003).

Na Figura 4.14 apresenta-se a evolução das deformações por fluência em dois prismas betonados com BAC-F, quando sujeitos a um carregamento constante. Os referidos prismas foram mantidos no interior dos moldes e cobertos com um plástico numa câmara a $T=20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\% \pm 5\%$ até aos 2 dias, idade em que foram desmoldados e sujeitos a um carregamento durante sensivelmente 4 meses. As deformações apresentadas, deformações devido a fenómenos de fluência, correspondem às deformações lidas nos prismas colocados nas prensas (Figura 4.11) subtraídas das deformações observadas nos prismas sujeitos exclusivamente a retracção.

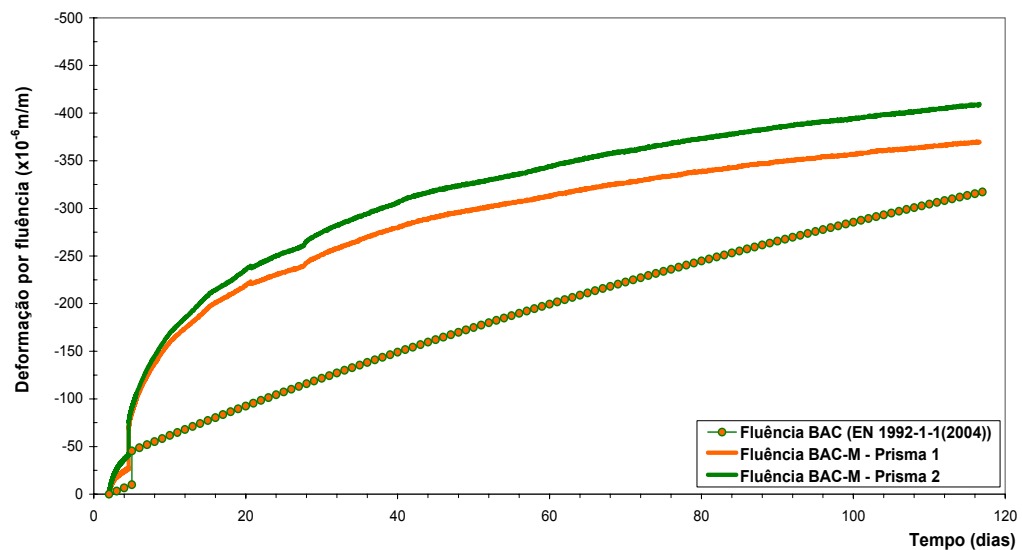


Figura 4.14 – Evolução ao longo do tempo das deformações por fluência

No mesmo gráfico é ainda apresentada a curva de fluência segundo as expressões preconizadas pelo EN 1992-1-1 (2004) e cujos parâmetros caracterizadores encontram-se descritos no Quadro 4.5. De salientar que durante o ensaio ocorreu um reajuste no sistema de pressão que aplicava o carregamento aos prisma, reflectindo-se num aumento da carga aplicada, patente no gráfico através de um pequeno “salto” nas curvas.

Comparando as curvas experimentais com a obtida através das expressões do EN 1992-1-1 (2004), observa-se um andamento diferente, com as curvas experimentais a apresentarem um desenvolvimento mais acentuado nos primeiros meses. Apesar das diferenças exibidas nas idades mais jovens, verifica-se que os resultados obtidos experimentalmente tendem a aproximar-se dos valores teóricos das deformações por fluência.

Tal como mencionado anteriormente, as composições de BAC apresentam geralmente menor conteúdo em agregado grosso e maior volume de pasta, sendo por isso expectável maiores deformações por fluência. Por outro lado, o facto de tipicamente o BAC possuir uma relação água/finos mais baixa do que o BC, a que se associa uma maior resistência à compressão e uma menor porosidade interna, contribui favoravelmente para a fluência. Devido, em grande parte, a esta dualidade de factores, os resultados reportados na literatura são ainda escassos e bastante contraditórios (Bonen e Shah, 2005).

4.4.2 Aferição e comparação das propriedades de durabilidade

O betão armado resulta de uma simbiose entre o betão e o aço. Se por um lado, o betão necessita do aço para que possa apresentar um bom comportamento quer à flexão quer à tracção, por outro lado, o aço exposto ao ar e à água rapidamente se deteriora, necessitando do betão para o proteger destas agressões. O betão constitui um meio excelente de protecção das armaduras, combinando o facto de ser uma barreira física à penetração dos agentes agressivos e de ser um meio extremamente alcalino, permitindo a passivação do aço (Dhir e McCarthy, 1999). Uma acção mais interventiva na prevenção da durabilidade deste material torna-se fulcral para que sejam atingidos tempos de serviço mais longos e com baixos custos de manutenção. Com o intuito de aumentar a durabilidade do betão surgiram diferentes tecnologias, como o caso do betão auto-compactável ou dos sistemas de cofragem de permeabilidade controlada (CPF).

Com a tecnologia do BAC pretende-se obter estruturas mais duráveis à custa de uma maior homogeneidade do betão e de maior resistência ao movimento de agentes agressivos. Dadas as claras diferenças na concepção e colocação do BAC é expectável que a sua microestrutura seja diferente da do betão convencional. Esta alteração na estrutura interna faz por isso prever alterações nos mecanismos de transporte dos agentes agressivos no interior do betão e consequentemente influências nos próprios processos de degradação. Ironicamente, actualmente a aplicação do BAC constitui de certa forma um risco, dada a falta de conhecimento no que concerne à durabilidade deste material (Schutter, Audenaert *et al.*, 2003). Um grande número de estudos têm sido realizados no

que concerne à concepção da composição ou trabalhabilidade do BAC, contudo investigações aprofundadas sobre a hidratação e durabilidade só agora começaram a dar os primeiros passos.

4.4.2.1 Absorção de água por capilaridade

A água é o elemento que assume maior importância na entrada de agentes agressivos no interior do betão, e simultaneamente, a sua presença fornece a humidade necessária para alimentar o mecanismo da corrosão das armaduras. Conhecer bem a capacidade da água fluir no interior do betão é um dado importante na avaliação da sua durabilidade. O transporte na camada superficial de betão é controlado por três mecanismos/processos, nomeadamente, a absorção capilar, a permeabilidade e a difusão (Sonebi, Bartos *et al.*, 2000). A absorção capilar corresponde à entrada de água na rede porosa de betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares. Este mecanismo ocorre se o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem e é proporcional à raiz quadrada do tempo e ao raio capilar (Coutinho, 1998).

A velocidade, extensão e efeitos deste transporte dependem, do ponto de vista físico, da estrutura dos poros e fendas e, do ponto de vista químico, da composição do cimento, das adições e das propriedades dos agregados (Coutinho, 1998). A Figura 4.15 representa uma curva típica de um ensaio de absorção capilar, na qual é possível identificar fundamentalmente três comportamentos distintos.

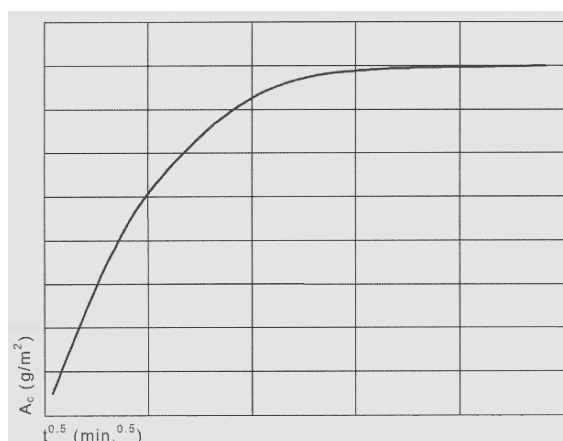


Figura 4.15 – Curva típica do ensaio de absorção capilar

Numa primeira fase, correspondente à maior inclinação da curva, verifica-se o preenchimento com água dos capilares de maior diâmetro. O resultado dos ensaios de absorção capilar obtidos por diversos autores têm validado a dependência linear da quantidade de água absorvida com a raiz quadrada do tempo nas primeiras horas de ensaio, o que permite a determinação do coeficiente de absorção capilar, S , segundo a Equação (4.1) (Coutinho, 1998).

$$A = a_0 + St^{0.5} \quad (4.1)$$

Onde A representa a quantidade de água absorvida por unidade de área da secção em contacto com a água, desde o início do ensaio (g/m^2), a_0 corresponde à água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto (g/m^2), S o coeficiente de absorção ($\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min.}^{1/2})$) e t o tempo de ensaio (min.)

A segunda parte da curva reflecte uma absorção mais lenta decorrente do preenchimento dos capilares mais finos e a terceira fase caracteriza-se por uma estabilização indicando um completo preenchimento da rede capilar. A caracterização da durabilidade do betão recorrendo ao coeficiente de absorção capilar, S , definido a partir dos resultados das primeiras horas de ensaio, é justificada pelo facto de caracterizar o período de absorção capilar dos poros de maior diâmetro, que funcionam como caminhos privilegiados para a penetração de agentes agressivos.

Para a determinação do coeficiente de absorção capilar foi seguida, embora ligeiramente adaptada, ver (Sonebi, Bartos *et al.*, 2000), a recomendação da RILEM TC 166-PCD (1999). De forma resumida, o procedimento de ensaio adoptado foi o seguinte: os provetes são colocados a secar, a uma temperatura de $40^\circ \pm 5^\circ \text{C}$, até atingirem massa constante, considerando-se o provete seco, quando a diferença entre as pesagens sucessivas m_i e m_{i+1} , decorrido 4 horas de intervalo entre elas, for inferior a $0.1\% m_i$. Em cada provete são seladas as faces laterais e a face superior é coberta com um plástico por forma a minimizar as trocas de humidade e temperatura com o ar envolvente. Imediatamente antes do ensaio é medida a massa de cada provete (m_0) e, em seguida, a face moldada do provete é imersa em água até uma altura máxima de 3mm, dentro de um recipiente.

A água absorvida por capilar é medida através da massa dos provetes $m(t)$ em intervalos de tempo de tempo de 10min., 30min., 1h, 4h, 18h e 24h após o contacto com a água. Para cada intervalo de tempo especificado é calculada a massa de água de absorção da cada provete testado, $(m(t)-m_0)$, e dividida pela área da superfície em contacto com a

água, obtendo-se os valores da absorção de água por unidade de área da superfície de ensaio (g/m^2). Com os resultados obtidos representa-se em abcissas \sqrt{t} sendo t , em minutos, o intervalo de tempo decorrido desde o instante zero em que o provete foi introduzido na água, e em ordenadas a massa de água absorvida por unidade de área, em g/m^2 . Estes pares de valores são aproximados por uma recta, pelo método dos mínimos quadrados, cuja inclinação corresponde ao coeficiente de absorção do respectivo provete (Nunes, 2001).

Na realização deste ensaio foram utilizadas as faces laterais de cubos com 150mm de aresta, que segundo a recomendação da RILEM devem ser utilizadas as faces perpendiculares à face de enchimento (Figura 4.16a). Em cada cubo foram cortadas duas fatias de 5cm de espessura com uma das faces moldadas, designadas no caso do BAC, por BAC-M-A e BAC-M-C, (Figura 4.16a). Este ensaio foi realizado apenas para os provetes moldados durante o ensaio à escala real, pelo que não se apresenta qualquer resultado da absorção por capilaridade da composição de BAC realizada na FEUP. Uma fotografia dos provetes durante a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade é apresentada na Figura 4.16b.

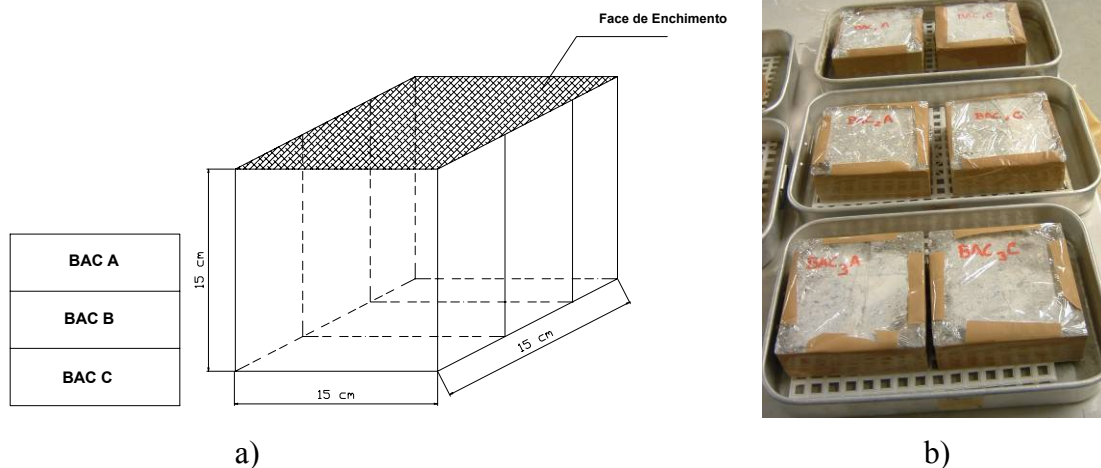


Figura 4.16 – a) Identificação dos provetes utilizados no ensaio; b) Provetes durante o ensaio de absorção de água por capilaridade

No Quadro 4.6 apresentam-se os resultados do ensaio de absorção por capilaridade realizado aos 28 dias, nomeadamente, o coeficiente de absorção (S), a água absorvida inicialmente pelos poros (a_0) e o coeficiente de correlação obtido por ajuste dos resultados a uma recta.

Quadro 4.6 – Valores de S , a_0 e R^2 do ensaio de absorção capilar

Provetes	BAC-M			BC-M		
	S	a_0	R^2	S	a_0	R^2
	$\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2})$	g/m^2		$\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2})$	g/m^2	
1-A	18.67	251.91	0.936	23.10	323.05	0.926
1-C	18.31	238.22	0.942	19.78	306.88	0.925
2-A	17.44	248.24	0.936	21.50	351.46	0.911
2-C	15.07	232.98	0.931	20.38	355.79	0.925
3-A	23.36	267.51	0.952	21.11	331.01	0.931
3-C	17.91	272.49	0.953	24.66	313.83	0.942
<i>Média(c.v.)</i>	$S = 18.46 \text{ g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2}) (\delta=14.7\%)$			$S = 21.75 \text{ g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2}) (\delta=8.36\%)$		

O valor médio do coeficiente de absorção medido nos provetes de BAC foi de 18.46 ($\delta=14.7\%$), enquanto que nos provetes de betão convencional foi de 21.75 ($\delta=8.4\%$). Estes resultados sugerem que a camada superficial de betão é mais densa e mais resistente à entrada da água no BAC do que no BC. O melhor comportamento do BAC poderá justificar-se pela maior presença de finos na sua composição e por uma boa dispersão das partículas de cimento e filler proporcionada pelo superplastificante. Estes factores contribuem para que o BAC apresente uma rede porosa mais fechada e poros capilares de menor diâmetro.

Teoricamente o conjunto de factores que controlam as propriedades de penetração no betão relaciona-se com o conteúdo em pasta, a estrutura de poros da matriz cimentícia e a zona interfacial à volta das partículas de agregado. A maior estabilidade da mistura em fresco e o uso adicional de finos, conjuntamente com a eliminação da vibração, potencia a que as composições de BAC apresentem uma microestrutura mais homogénea e zonas interfaciais mais densas. Alguns estudos sobre a microestrutura do BAC parecem confirmar que as zonas interfaciais à volta da armadura e de grandes partículas de agregados são mais densas e as suas propriedades mais homogéneas nas composições de BAC do que nas composições de betão convencional (Zhu e Bartos, 2003).

Nos ensaios de avaliação dos parâmetros de durabilidade os diferentes mecanismos de transporte são estudados separadamente, contudo em condições reais de exposição, estes mecanismos podem actuar simultaneamente ou de forma privilegiada em determinados períodos. Por isso quando se lidam com problemas reais de durabilidade, tais como corrosão das armaduras das estruturas de betão, devem ser considerados os diferentes mecanismos de transporte e as suas interacções e importância relativa.

4.4.2.2 Resistência à penetração dos cloretos

A maior parte dos processos que provocam deterioração nas estruturas de betão envolve a movimentação de agentes agressivos (como por exemplo dióxido de carbono ou oxigénio) para o interior do betão e portanto até às armaduras. A resistência à penetração dos cloretos constitui assim uma importante propriedade para avaliar a durabilidade do betão.

A penetração de cloretos para o interior do betão pode ocorrer por difusão por diferenças de concentração de cloretos, por absorção de água com cloretos ou por permeação por diferenças de pressão. O fenómeno de difusão é preponderante no caso de um betão muito compacto e sem fissuras, enquanto que para um betão mais poroso e com fissuras, a absorção é o mecanismo mais importante (Coutinho, 1998).

A forma mais adequada para avaliar a resposta do betão à penetração de cloretos consiste em realizar ensaios de exposição natural, contudo estes ensaios são extremamente morosos. Por este motivo, diversos autores têm procurado desenvolver ensaios acelerados a realizar em laboratório baseados nos fenómenos de difusão e migração. A difusão é um processo que consiste no transporte de matéria resultante do movimento aleatório das partículas, na solução dos poros resultando num fluxo de uma região de maior concentração para outra de menor concentração da substância difusora. Quando o fluxo dos iões é conseguido devido à presença de um campo eléctrico exterior, o fenómeno é designado por migração. Existem vários métodos para avaliar a difusão ou migração de cloretos podendo se classificar as técnicas utilizadas em duas categorias: regimes estacionários e regimes não estacionários.

No decorrer deste trabalho foram utilizados dois ensaios de migração em regime não estacionário para avaliar a resistência à penetração de cloretos, o ensaio de determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos (*Ensaio Coulomb*) e o método rápido CTH.

i. Ensaio de determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos

O ensaio de determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos encontra-se regulamentado pela ASTM C1202-97 (1997) e geralmente é conhecido como *Ensaio de Coulomb*. O ensaio consiste basicamente em determinar a quantidade de corrente eléctrica que passa através de um provete de betão quando lhe é aplicada uma diferença de potencial conhecida (60V) durante um certo intervalo de tempo (6h). Os iões cloretos são forçados a migrar de uma solução de NaCl em contacto com uma das faces do provete e sujeita a uma

carga negativa, para o interior do betão até à outra face onde se encontra uma solução de NaOH carregada positivamente (Coutinho, 2001).

A carga que passa através dos provetes traduz uma medida relativa da permeabilidade do betão aos cloretos. No Quadro 4.7 apresenta-se uma escala elaborada por *Whiting* onde se correlaciona a carga transferida com a permeabilidade aos cloretos, em betões com diferentes relações w/c.

Quadro 4.7 – Escala de Whiting para a permeabilidade aos cloretos (ASTM C1202-97 (1997))

Carga Q (C)	Penetração de cloretos	Relação w/c
>4000	Elevada	>0.6
>2000 e <4000	Média	>0.4 e <0.6
>1000 e <2000	Baixa	<0.4
>100 e <1000	Muito Baixa	Betão com selante
<100	Desprezável	Betão com polímeros

Os métodos de migração são, sem dúvida, mais rápidos do que os baseados na difusão, no entanto apresentam algumas desvantagens. Existem algumas reservas quanto aos resultados obtidos com esta técnica, nomeadamente no que se refere à dependência do parâmetro determinado relativamente à mobilidade de todos os iões na solução intersticial e das reacções que se produzem junto dos eléctrodos, em particular, na presença de um campo eléctrico forte. Para além de que um potencial alto, com o intuito de diminuir o tempo de ensaio, pode elevar excessivamente a temperatura dos provetes, facilitando a transferência de carga eléctrica.

Este ensaio foi realizado aos 28 dias, mas apenas para os provetes betonados na FEUP, isto é, para a composição BAC-F, tendo se utilizado discos de 10cm de diâmetro e 5cm de espessura, retirados de provetes cúbicos, tal como ilustra a Figura 4.17a. Foram ensaiados os discos com as faces moldadas, isto é, a face A (BAC A) e a face C (BAC C), Figura 4.17b.

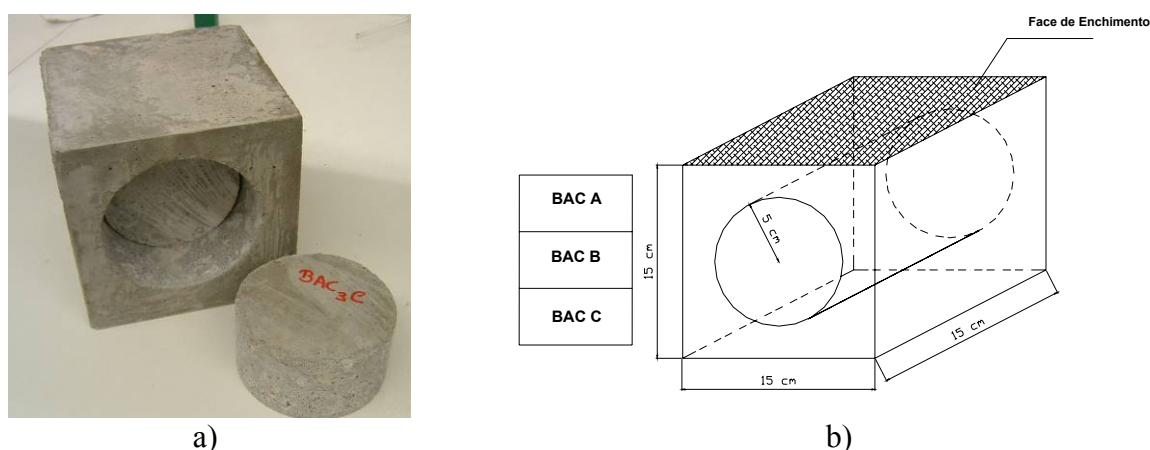


Figura 4.17 – a) Provetes utilizados no *Ensaio de Coulomb*; b) Identificação dos provetes utilizados no ensaio

Os resultados apresentados no Quadro 4.8 mostram que o betão estudado é moderadamente penetrável pelos cloretos, isto é, o betão oferece uma resistência média à penetração dos cloretos, considerando a norma ASTM C1202-97 (1997). A classe de penetrabilidade dos iões cloretos “moderada”, corresponde ao intervalo de [2000; 4000] Coulomb, tratando-se segundo a escala elaborada por *Whiting* de um valor típico de betões correntes com uma razão água/cimento de 0.4 a 0.6.

Quadro 4.8 – Resultados da permeabilidade do betão aos iões de cloreto

	Provetes	Carga total passada	Penetração dos cloretos
		Coulombs	
BAC-F	CL1-A	3404	<i>Média</i>
	CL1-C	3308	<i>Média</i>
	CL2-A	3356	<i>Média</i>
<i>Média(c.v.)</i>		3356 ($\delta=1.43\%$)	<i>Média</i>

ii. Método rápido CTH

Como foi referido anteriormente, o método descrito na ASTM C 1202-97 (1997), tem sido alvo de algumas críticas, pelo que outros métodos têm vindo a ser propostos. O *Método rápido CTH* foi desenvolvido na Suécia, posteriormente regulamentado pela norma NT BUILD 492 (1999) e recentemente adoptado na especificação do LNEC E 463 (2004). Este método não estacionário baseia-se numa relação teórica entre os

fenómenos de difusão e migração e através do qual se pode determinar a profundidade de penetração dos cloretos ou o perfil (Figura 4.18).

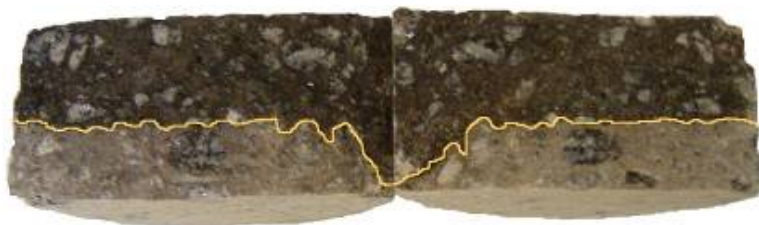


Figura 4.18 – Avaliação da profundidade de penetração

A medição da profundidade de penetração dos cloretos (x_d) é efectuada através de um processo colorimétrico sobre as superfícies de fractura dos provetes abertos por compressão linear. O processo colorimétrico permite realçar as zonas do provete onde existiu penetração de cloretos (zona mais clara na Figura 4.18), facilitando a definição do perfil de penetração. Assim, utilizando a 2ª lei de Fick e a profundidade média de penetração dos cloretos calcula-se o coeficiente de difusão aparente (D_{ns}).

Utilizando os resultados do ensaio CTH é ainda possível determinar a resistividade do betão. A resistividade é uma propriedade intrínseca que está relacionada com a capacidade do betão para transportar carga eléctrica e que por sua vez depende da natureza e topografia da estrutura porosa, da distribuição de água, da concentração iónica na solução intersticial e da temperatura. Compreende-se que pelo facto de todos os provetes no ensaio CTH se encontrarem nas mesmas condições, esta medida permita avaliar a estrutura porosa do betão, constituindo uma valiosa informação do ponto de vista da durabilidade. Após a montagem do provete na respectiva célula de difusão, aplica-se uma diferença de potencial conhecida e mede-se a intensidade de corrente que passa através do provete. Partindo dos valores do potencial e da intensidade de corrente, a resistividade eléctrica do provete é determinada aplicando a Lei de Ohm, conforme se indica na Equação (4.2).

$$R = \frac{V}{I} \Leftrightarrow R = \rho \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V.A}{L.I} \quad (4.2)$$

Onde R representa a resistência eléctrica (Ω), I a intensidade de corrente (A), V a diferença de potencial (V), ρ a resistividade eléctrica ($\Omega.m$), L o comprimento (m) e A a área (m^2).

Este método foi aplicado ao mesmo tipo de provetes dos utilizados no ensaio de determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos (ASTM C 1202-97 (1997)), ver Figura 4.17. Os resultados obtidos para os provetes ensaiados encontram-se resumidos no Quadro 4.9, apresentando-se o valor da resistividade, da profundidade média de penetração e do coeficiente de difusão aparente. Para as composições BAC-M e BC-M não foi possível determinar a resistividade do betão.

Quadro 4.9 – Resultados do ensaio de CTH

	Provetes	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Profundidade média de penetração (cm)	Coeficiente de difusão ($D_{ns} \cdot m^2/s$)
BAC-F	CL1-A	87.7	1.78	8.61×10^{-12}
	CL1-C	91.5	2.03	9.85×10^{-12}
	CL2-A	84.6	2.00	9.68×10^{-12}
	CL2-C	68.0	2.14	10.30×10^{-12}
	CL3-A	94.0	1.99	9.63×10^{-12}
	CL3-C	89.9	2.12	10.30×10^{-12}
	CL4-A	69.8	2.29	11.10×10^{-12}
	Média(c.v.)	83.6 (12.6%)	2.05 (7.7%)	9.98×10^{-12} (7.7%)
BAC-M	CL1-C	-	2.27	11.00×10^{-12}
	CL2-C	-	2.43	11.80×10^{-12}
	Média(c.v.)	-	2.35	11.40×10^{-12}
BC-M	CL4-C	-	2.71	13.40×10^{-12}
	CL5-C	-	2.84	14.00×10^{-12}
	Média(c.v.)	-	2.78	13.70×10^{-12}

Apesar da escassez dos resultados no que diz respeito às composições BAC-M e BC-M, observa-se uma maior profundidade de penetração dos cloretos nos provetes de betão convencional, conduzindo a um coeficiente de difusão aparente ligeiramente mais alto. Em termos comparativos, e à semelhança do que indicaram os resultados do ensaio de absorção capilar, pode concluir-se que o BAC apresenta uma microestrutura mais densa. Contudo, as diferenças nos resultados do coeficiente de difusão aparente das composições de BAC e de BC são mais difíceis de explicar pelo facto deste coeficiente ser calculado com base na profundidade de penetração, uma medida muito mais sensível à tortuosidade da rede porosa do que à dimensão e volume total dos poros (Zhu e Bartos, 2003).

Tal como sucede em outras características, o coeficiente de difusão do BAC produzido na MAPREL é semelhante ao obtido com a mesma composição produzida

previamente em laboratório, BAC-F. Para o BAC realizado na FEUP, o valor da resistividade calculado a partir do valor da intensidade de corrente após 2min do início do ensaio foi em termos médios de $83.6\Omega.m$.

4.4.2.3 Resistência à carbonatação

Uma das reacções químicas no betão que afectam a durabilidade pondo em risco as armaduras (betão armado ou pré-esforçado) é a carbonatação. A carbonatação é causada pela entrada de dióxido de carbono do ar através dos poros para o interior do betão reagindo com os compostos dissolvidos na solução aquosa intersticial. No caso da carbonatação progredir atingindo o betão envolvente das armaduras, estas, até aqui passivas, passarão a ser susceptíveis ao fenómeno da corrosão (Coutinho, 1998). A velocidade de carbonatação é influenciada de forma significativa por diversos factores que interactivam entre si, distinguindo-se a permeabilidade do betão, o teor de hidróxido de cálcio e óxido de cálcio disponíveis para a reacção, a concentração de dióxido de carbono e as condições de exposição.

Tal como foi referido anteriormente para a penetração de cloretos, a melhor forma de avaliar o desempenho do betão relativamente ao efeito da carbonatação é através de ensaios de exposição natural. Contudo o baixo teor de CO_2 do ambiente natural tornaria os ensaios para avaliação da carbonatação do betão extremamente morosos. Como tal é corrente a realização de ensaios acelerados em câmaras com temperatura e humidade controladas e onde o ar é artificialmente enriquecido com CO_2 .

A determinação da resistência à carbonatação foi realizada segundo o procedimento descrito na Especificação E 391 (1993), que indica que os provetes devem estar expostos numa câmara com $5\%\pm 0.1\%$ de CO_2 , $60\%\pm 5\%$ de humidade relativa e à temperatura de $23\pm 3^\circ C$. O ensaio foi realizado em discos de 15cm de diâmetro e 10cm de altura obtidos a partir de provetes cilíndricos ($\varnothing=15cm$ e $h=30cm$). Após 3 meses de exposição os provetes foram abertos e tratados com fenolftaleína para que se tornasse visível a profundidade de carbonatação, adquirindo uma coloração rosa a superfície de betão onde não ocorreu carbonatação (Figura 4.19).

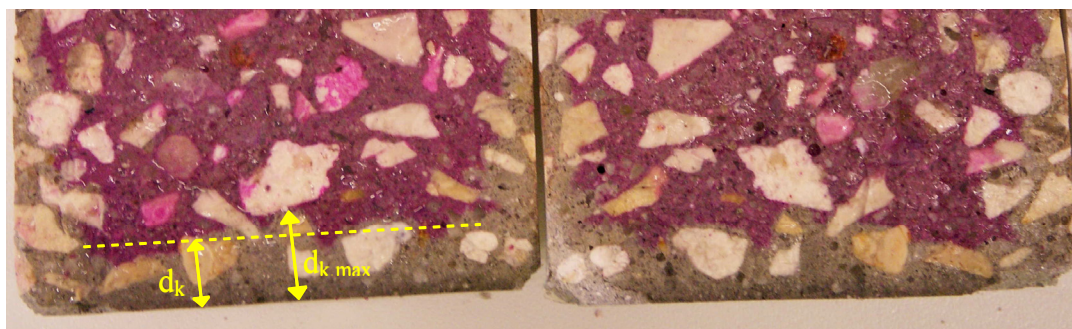


Figura 4.19 – Avaliação da profundidade de penetração

A profundidade de carbonatação é avaliada medindo a distância média entre a superfície e a frente de carbonatação (d_k) e no caso da frente de carbonatação não se desenvolver paralelamente à superfície ou apresentar zonas irregulares deve também ser medido a profundidade máxima ($d_{k,max}$) (Figura 4.19). Os valores da profundidade média e máxima de carbonatação dos provetes de BAC e BC sujeitos à carbonatação acelerada são apresentados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Profundidade média e máxima de carbonatação nos provetes BAC e BC betonados na MAPREL

	Provetes	Profundidade média (d_k)	Profundidade máxima ($d_{k,max}$)
BAC-M	Cb-1	2.5mm	4.0mm
	Cb-2	1.5mm	3.0mm
	<i>Média 2.0mm</i>		<i>Máximo 4.0mm</i>
BC-M	Cb-1	3.0mm	6.0mm
	Cb-2	3.0mm	4.0mm
	<i>Média 3.0mm</i>		<i>Máximo 6.0mm</i>

Embora o número de provetes ensaiados tenha sido reduzido, a análise dos valores da profundidade de carbonatação permite afirmar que o BAC e o BC apresentam um comportamento semelhante embora ligeiramente melhorado no caso do BAC. Tal como sucedeu nos ensaios anteriores (ensaio de absorção de água por capilaridade e ensaio de penetração de cloratos) estes resultados vêm comprovar o melhor comportamento do BAC ao ataque de agentes exteriores de degradação, potenciando por isso um betão com maior durabilidade.

CAPÍTULO 5

ENSAIO À ESCALA REAL EM RIO MAIOR

5.1 MOTIVAÇÃO

O betão auto-compactável, pelo facto de garantir maior homogeneidade e uma melhor microestrutura, promove ao nível das estruturas de betão armado e pré-esforçado uma maior durabilidade. Apesar de pouco divulgada, a sua utilização conjuntamente com sistemas CPF – *Controlled Permeability Formwork* deverá permitir atingir níveis de durabilidade superiores.

O sistema CPF consiste na utilização de um filtro/dreno fixo à cofragem que drena os excedentes de água e ar e retém à superfície do betão as partículas de cimento (Figura 5.1). Como consequência, as camadas superficiais do betão ficam muito mais ricas em cimento, mais densas e impermeáveis, correspondem a valores da razão água/ligante muito mais baixas. Além disso o filtro, saturado em água, permite a formação de uma “pele” à superfície do betão (Coutinho, 1998). A formação desta “pele” garante um sistema de cofragem com permeabilidade controlada, uma vez que à superfície do betão fica disponível a água necessária para uma boa hidratação do cimento presente.

A utilização do CPF por um lado reduz a pressão na cofragem, e por outro lado permite obter um betão com uma superfície praticamente desprovida das usuais imperfeições e com uma qualidade francamente melhorada das camadas superficiais, isto é, maior durabilidade e resistência superficial, devido à redução controlada da relação água/ligante (Coutinho, 1998). A redução da relação água/cimento e o maior volume de pasta de cimento na zona superficial tem como consequências a diminuição da velocidade de carbonatação e de penetração de cloretos e o aumento da resistência ao gelo/degelo.

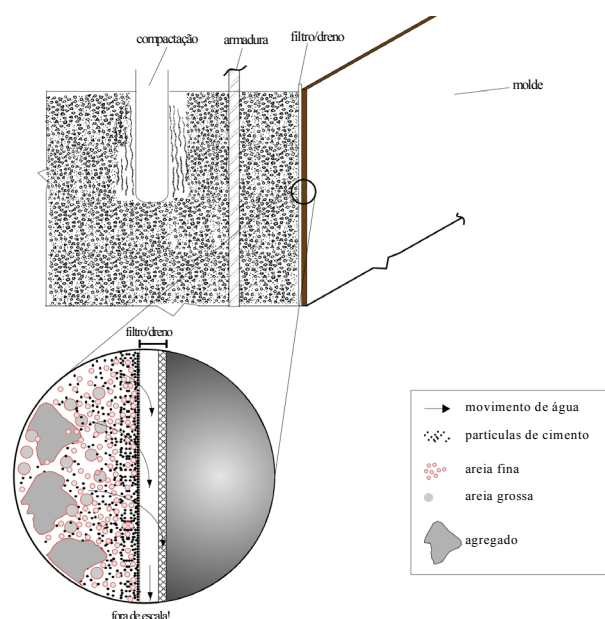


Figura 5.1 – Representação esquemática do funcionamento de CPF – cofragem de permeabilidade controlada (Coutinho, 1998)

Um dos objectivos dos ensaios à escala real na fábrica de pré-fabricação de Rio Maior foi avaliar e comparar a eficácia da aplicação do sistema CPF em peças betonadas com BAC relativamente à sua utilização em peças de betão convencional. Procurou-se comparar o desempenho de dois sistemas de CPF diferentes aplicados em duas box-culverts, uma betonada com betão convencional e outra com betão auto-compactável. Esta experiência permitiu ainda tecer algumas considerações quanto à homogeneidade das duas peças e comparar as propriedades endurecidas, mecânicas e durabilidade, do betão das box-culverts com o de provetes moldados.

Tal como aconteceu com a experiência levada a cabo na fábrica de Nelas (ver Capítulo 4), pretende-se com estes ensaios à escala real avaliar a adequabilidade dos processos produtivos correntes de amassadura, transporte e colocação do betão, e identificar as alterações que é necessário introduzir para tornar a utilização do BAC numa tecnologia mais rentável e capaz de garantir um betão de melhor qualidade.

5.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

5.2.1 Elementos betonados

Para esta experiência foram seleccionadas quatro peças, dois troços de vigas I com 3.0m de comprimento e duas box-culverts (comprimento=2.5m, altura=1.15m,

largura=2.32m e espessura das paredes=0.14m). Duas das peças, uma viga I e uma box-culvert foram betonadas com betão auto-compactável e as outras duas com betão convencional, utilizando a composição que estava a ser utilizada na fábrica para a betonagem das referidas peças. As dimensões dos elementos betonados, viga I e box-culvert, apresentam-se na Figura 5.2a e Figura 5.2b, respectivamente.

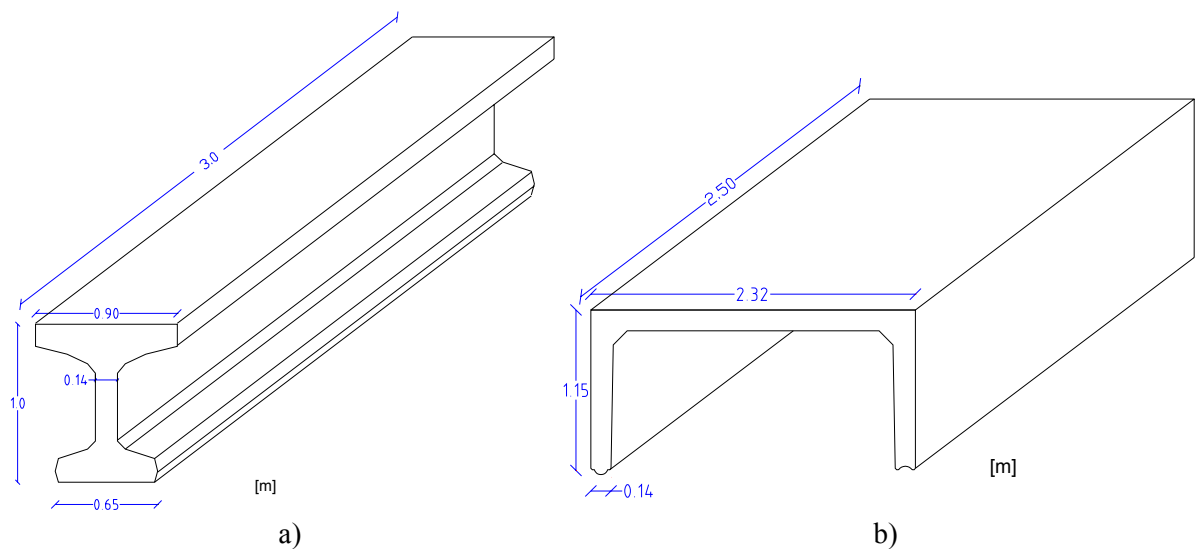


Figura 5.2 – Dimensões das peças betonadas durante o ensaio à escala real: a) troço de viga I; b) box-culvert

Para além da geometria complexa, o troço de viga I seleccionado corresponde à zona de ancoragem dos cabos de pré-esforço onde o espaçamento entre as armaduras é bastante reduzido e por isso as condições de betonagem são bastante mais exigentes (Figura 5.3). No caso do betão convencional a betonagem deste tipo de peças exige uma vibração exterior extremamente forte e portanto bastante dispendiosa do ponto de vista económico.



Figura 5.3 – Armaduras utilizadas no troço de viga-I betonado durante o ensaio

No que diz respeito às box-culverts, associado ao sistema de cofragem habitual foi utilizado um sistema de cofragem de permeabilidade controlada – CPF. Nas faces laterais exteriores das cofragens das box-culverts, quer na box-culvert betonada com BAC como na betonada com BC, foram aplicados dois filtros/drenos diferentes, designados neste trabalho por CPF-A e CPF-B. Nas figuras 5.4a e 5.4b é possível observar a colocação do filtro/dreno CPF-A e CPF-B, respectivamente, nas paredes laterais das cofragens das box-culverts. O filtro/dreno CPF-A apresenta pouca rigidez e a sua colocação deve ser bastante cuidada para que não fiquem rugas e, conseqüentemente, imperfeições na superfície de betão. O filtro/dreno CPF-B é mais rígido e a sua colocação é mais fácil. Enquanto o primeiro é adaptado à cofragem por meio de um cola em spray, que deve ser aplicada em toda a cofragem, o segundo é fixo à cofragem usando uma fita adesiva dupla (cola dos dois lados), colocada apenas nas extremidades. O aspecto final da cofragem, após a colocação do CPF-A e CPF-B é apresentado na Figura 5.5a e Figura 5.5b, respectivamente.

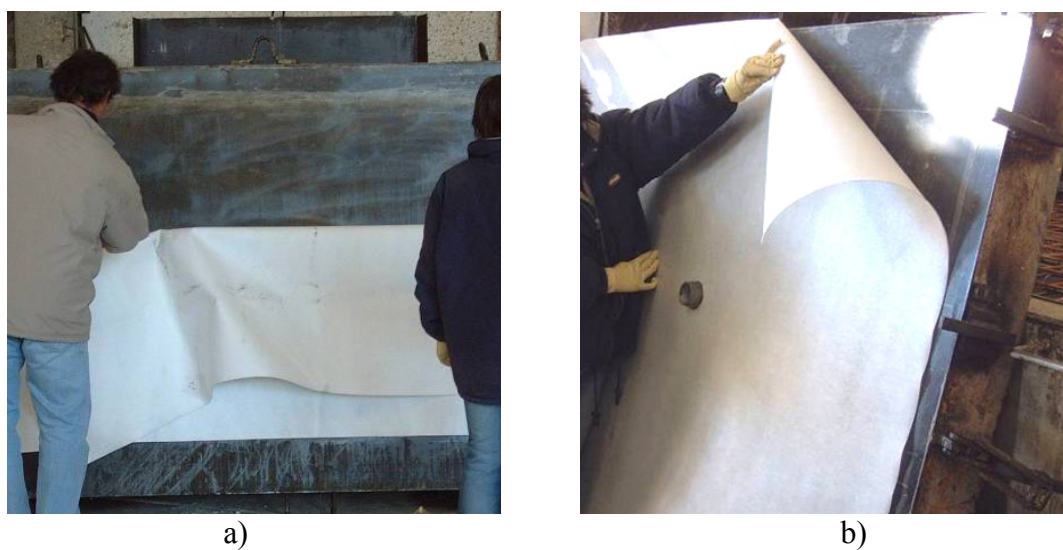


Figura 5.4 – Aplicação do CPF nas faces laterais exteriores da cofragem das box-culvert:
a) CPF-A; b) CPF-B



Figura 5.5 – Face lateral exterior da cofragem da box-culvert após a aplicação do CPF: a) CPF-A; b) CPF-B

Na malha de armaduras utilizada nas box-culverts foram realizados, em cada uma das faces laterais e superior, um rasgo central quadrado com cerca de 1,0m de lado, com o intuito de posteriormente facilitar a extracção de carotes (Figura 5.6). As carotes permitirão, por um lado, caracterizar o betão da peça a diferentes alturas e assim detectar a possível ocorrência de segregação e por outro lado, avaliar os efeitos do uso do CPF nas características do betão endurecido.



Figura 5.6 – Armaduras utilizadas nas box-culverts betonadas durante o ensaio

5.2.2 Amassadura, transporte e colocação

A fábrica da MAPREL em Rio Maior possui uma misturadora fixa de eixo vertical, com capacidade para misturar um volume máximo de 2m^3 de betão. O transporte do betão desde a misturadora até ao local da betonagem é realizado por uma máquina transportadora e a descarga faz-se através de uma haste com um “parafuso sem fim” (Figura 5.7). A descarga do betão é então realizada lançando o betão de uma altura de cerca de 0.5m a partir da extremidade do “parafuso sem-fim” para o interior da cofragem.

Este sistema de descarga de betão revela-se no entanto bastante limitativo no caso da betonagem de box-culverts maiores uma vez que a cofragem destes elementos é mais alta do que a altura máxima atingida pelo parafuso sem-fim do veículo. Uma outra limitação deste sistema de transporte e descarga do betão prende-se com o facto da capacidade do veículo ser mais pequena que a capacidade da misturadora o que provoca atrasos na produção, especialmente no caso da utilização BAC onde não é necessário esperar o tempo destinado à vibração. Por outro lado, o facto da capacidade do veículo ser menor que a capacidade da peça a betonar pode originar o aparecimento de juntas frias, que para além de uma alteração localizada no aspecto da superfície constituem pontos fracos a nível mecânico e de durabilidade.



Figura 5.7 – Máquina de transporte do betão, durante a betonagem de uma box-culvert

Durante o ensaio à escala real realizaram-se três amassaduras de BAC, uma das quais destinada à betonagem do troço de viga I e as outras duas à betonagem da box-culvert e de alguns provetes para posterior caracterização do betão. O procedimento de mistura foi o mesmo que o utilizado para o betão convencional, contudo o tempo de

mistura foi incrementado. No quadro seguinte, Quadro 5.1, apresentam-se para além da composição desenvolvida em laboratório (composição teórica), os desvios ocorridos nas diferentes amassaduras determinados com base na composição ajustada atendendo às humidade dos agregados.

Quadro 5.1 – Desvios e resultados dos ensaios do betão fresco das amassaduras de BAC realizadas durante os ensaios

Material	Composição Teórica	Amassaduras		
		Desvios 1ª amassadura	Desvios 2ª amassadura	Desvios 3ª amassadura
	kg/m ³	%	%	%
cimento (CEM I 52.5R)	379	0.00	0.18	0.18
filer calcário (Micro100)	192	0.00	0.00	0.00
brita	810	0.25	0.17	0.17
areia 1	600	0.79	0.53	0.53
areia 2	202	-1.90	-0.95	-1.58
água	154.0	0.00	0.00	0.00
superplastificante	13.20	0.00	0.00	0.00
ensaio de espalhamento		Desp=595 mm T50=4.37s	Desp =575 mm T50=5.34s	Desp =565 mm T50=5.62s
ensaio de fluidez		Tfunil=9.60s	Tfunil =17.62s	Tfunil =14.97s
ensaio da caixa U		H=340mm	H =340mm	H =340mm

Na fábrica de Rio Maior os agregados, antes de serem colocados nos respectivos silos, são mantidos no exterior da fábrica em toldas e portanto sujeitos às variações climáticas (Figura 5.8). Por consequência, o teor de humidade dos agregados vai sofrendo variações significativas obrigando a correcções frequentes das composições teóricas. No ensaio, à escala real, a humidade dos agregados foi determinada a partir de amostras retiradas das toldas de armazenamento, recorrendo ao método do micro-ondas preconizado na norma americana ASTM D 4643 (1993). Assim, para as amassaduras realizadas admitiu-se que a brita apresentava 0.5% de humidade, a areia fina natural 6.5% e a areia grossa natural 6.0%.



Figura 5.8 – a) Armazenamento dos agregados; b) Silos da central de betão

Para atender à maior eficiência da misturadora da fábrica, quando comparada com a mistura realizada em laboratório, a alguma incerteza na determinação das humidades dos agregados e a uma possível variação na granulometria dos próprios agregados o conteúdo em água e superplastificante da composição foram ligeiramente reduzidos. Pretendia-se desta forma evitar essencialmente potenciais problemas de segregação. No Quadro 5.1 são também apresentados os resultados obtidos para o ensaio de espalhamento, funil e caixa-U, nas diferentes amassaduras. Através dos resultados destes ensaios conclui-se que o betão produzido durante o ensaio à escala real exibiu menor deformabilidade e maior viscosidade quando comparado com o betão realizado em laboratório. No caso, por exemplo, do ensaio de espalhamento, a média dos diâmetros de espalhamento das amassaduras realizadas na fábrica foi de 578mm (Figura 5.9) enquanto que em laboratório o diâmetro médio obtido foi de 630mm.



Figura 5.9 – Ensaio de espalhamento realizado durante o ensaio à escala real

Na figuras 5.10a e 5.10b é possível observar a betonagem viga I e da box-culvert betonadas com BAC, respectivamente.



a)



b)

Figura 5.10 – a) Betonagem da viga I betonada com BAC; b) Betonagem da box-culvert betonada com BAC

Dois dias após a realização destes ensaios produziram-se duas amassaduras do betão habitualmente produzido para a betonagem das vigas I fabricadas na MAPREL de Rio Maior. Estas amassaduras destinaram-se à betonagem de um troço de viga I, à betonagem de uma box-culvert e ao enchimento de provetes.

5.3 PRODUTO FINAL -ASPECTO DOS ELEMENTOS BETONADOS

Depois de descofrar o troço de viga I betonada com BAC (Figura 5.11a) e o troço de viga I betonada com BC (Figura 5.11b), verificou-se que estes ficaram completamente cheios, aparentemente sem vazios interiores e com as armaduras completamente envolvidas. No entanto, fundamentalmente na superfície inclinada inferior das vigas, são visíveis alguns poros superficiais originados por bolhas de ar que se “libertaram” do interior do betão enquanto fresco. O sistema de descarga do betão da misturadora para o veículo que transporta o betão, a própria forma de descarregar o betão para o molde e o facto da composição ser mais viscosa potenciam a existência de uma maior quantidade de bolhas de ar no interior do betão. De salientar que a existência destas cavidades à superfície revelou-se ainda mais evidente na viga betonada com betão convencional.

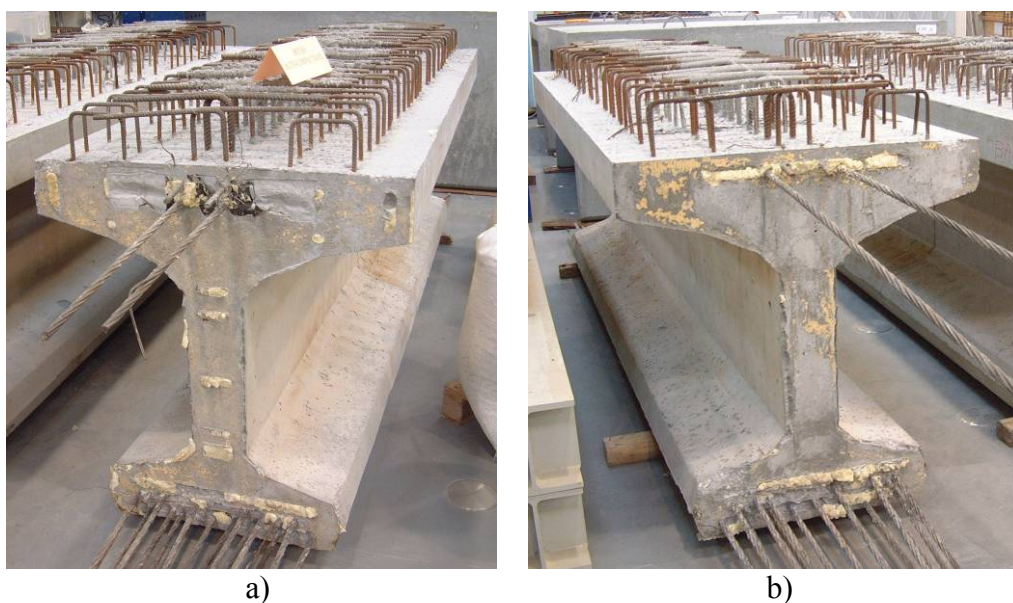


Figura 5.11 – a) Viga I betonada com BAC; b) Viga I betonada com BC

A qualidade da superfície final das peças é um aspecto importante a considerar, especialmente quando se formam à superfície cavidades profundas resultantes de grandes “bolhas de ar”. A formação destas cavidades constitui não só um problema a nível estético como também um problema de durabilidade da estrutura (Bernabeu, 2000).

A utilização do betão auto-compactável permite uma elevada qualidade no acabamento das superfícies, requerendo contudo especial cuidado na selecção do tipo de cimento e adições a utilizar, na concepção da composição, na qualidade da cofragem e do produto descofrante e nos processos de mistura, transporte e colocação. O ar é introduzido no betão durante o processo de mistura mas também durante o seu transporte e descarga. A quantidade de ar que fica preso no interior do BAC ou que é libertado durante a betonagem, depende da coesão da mistura. De facto pretende-se um betão com uma viscosidade suficientemente elevada para impedir a segregação e, ao mesmo tempo, suficientemente baixa para evitar a formação de poros à superfície. Segundo *BIBM et. al* (2005) as peças betonadas com BAC apresentam para além de bolhas de ar em menor número e dimensão, uma coloração mais uniforme e as arestas dos elementos bem delimitadas.

As box-culverts betonadas durante o ensaio à escala real ficaram completamente cheias e aparentemente sem vazios interiores. Na Figura 5.12a e Figura 5.12b é possível observar o aspecto das box-culverts betonadas com BAC e com BC, respectivamente.



Figura 5.12 – a) Box-culvert betonada com BAC ; b) Box-culvert betonada com BC

As superfícies das paredes laterais das box-culverts onde foram aplicados os sistemas CPF apresentam-se sem imperfeições e sem qualquer bolha de ar à superfície. No entanto, em ambas as faces onde foi utilizado o sistema CPF, CPF-A e CPF-B, observou-se a superfície com uma coloração pouco homogênea e a existência de algumas manchas, que não se observaram nas faces onde não foi aplicado CPF. Na Figura 5.13a e Figura 5.13b é possível observar o aspecto das superfícies laterais da box-culvert betonada com BAC onde foi aplicado CPF-A e CPF-B, respectivamente e na Figura 5.14 apresenta-se um pormenor dessas mesmas faces. Na box-culvert betonada com betão convencional observou-se igualmente uma coloração pouco homogênea e algumas manchas nas superfícies onde foi utilizado o sistema CPF.



Figura 5.13 – Aspecto das superfícies laterais da box-culvert betonada com BAC: a) superfície onde foi aplicado CPF-A; b) superfície onde foi aplicado CPF-B

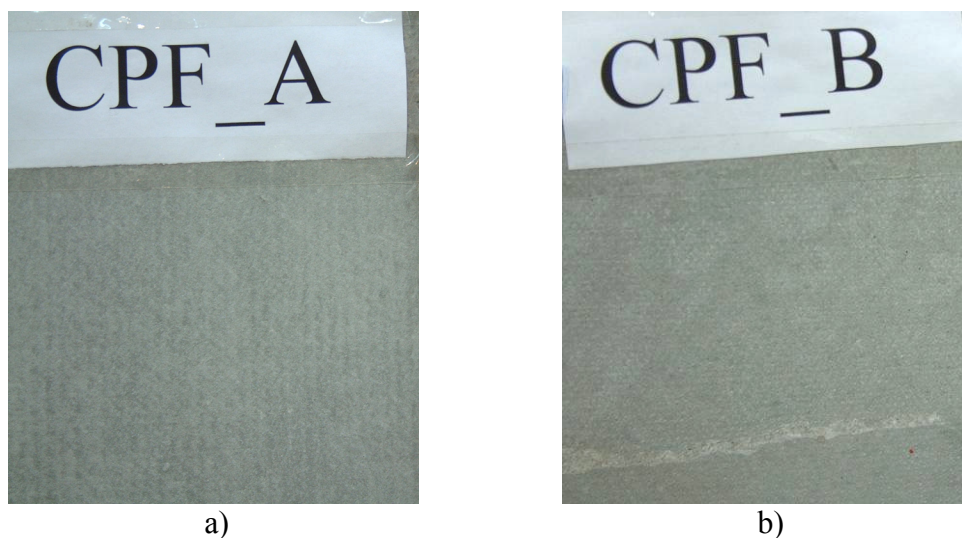


Figura 5.14 – Pormenor das superfícies da box-culvert: a) superfície onde foi aplicado CPF-A; b) superfície onde foi aplicado CPF-B

Relativamente às faces laterais interiores (sem CPF), são visíveis algumas bolhas de ar, principalmente na box-culvert betonada com betão convencional, como se mostra nas figuras 5.15a e 5.15b. As cofragens utilizadas na fábrica da MAPREL são de aço contudo, segundo estudos realizados por *Bernabeu* (2000) sobre a influência do material da cofragem na qualidade final da superfície do betão, as cofragens de madeira apresentam melhores resultados (devido ao efeito da absorção), quando comparadas com cofragens de aço ou contraplacado. Por outro lado recomenda-se que sejam utilizados óleos descofrantes vegetais e que a descarga de betão seja realizada com a boca de saída do tubo de descarga abaixo do nível do betão fresco já existente. De salientar que no caso de se aplicar o sistema CPF não se utiliza qualquer tipo de óleo descofrante.

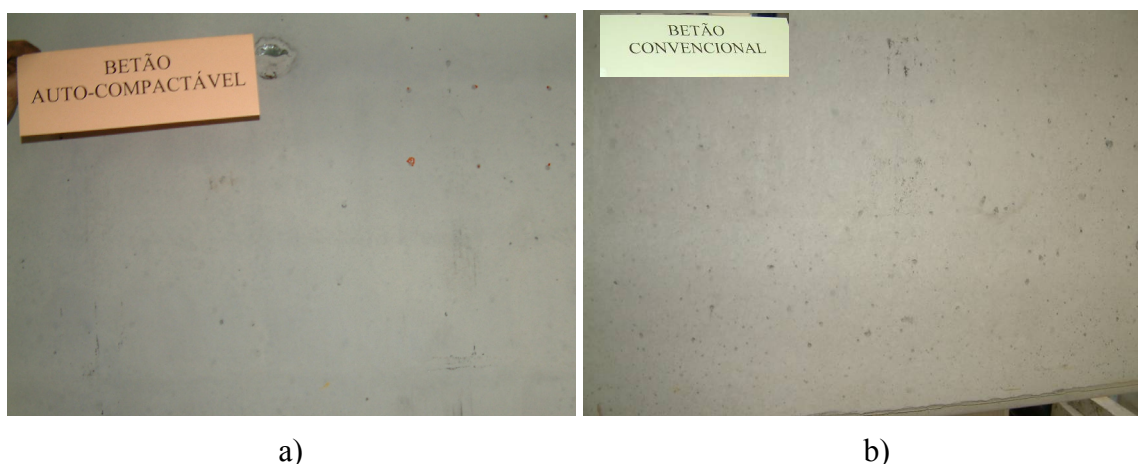


Figura 5.15 – Aspecto da superfície lateral interna: a) box-culvert betonada com BAC; b) box-culvert betonada com BC

5.4 PROPRIEDADES ENDURECIDAS DO BAC E DO BC

Aquando da experiência realizada na fábrica da MAPREL, em Rio Maior, fez-se uma amostragem do BAC produzido, para posterior caracterização em laboratório. De forma semelhante, dois dias depois, realizou-se uma amostragem do BC utilizado na betonagem das peças. O betão convencional utilizado para betonar a viga I e a box-culvert e do qual se encheram provetes, é utilizado actualmente na fábrica MAPREL para betonagem das vigas I. As composições de betão convencional e auto-compactável utilizadas durante os ensaios à escala real são apresentadas no Quadro 5.2. Analisando o custo das duas composições conclui-se que o preço dos materiais, por metro cúbico de betão auto-compactável, é 33% superior ao de betão convencional. Segundo *Juvas* (2005), apesar dos materiais poderem ser 15% a 25% mais caros do que no caso do betão convencional da mesma classe de resistência, os lucros decorrentes da utilização desta tecnologia poderão ser de 5% a 15%, isto quando forem incluídos os preços de todos os trabalhos de construção. A diferença nos custos dos materiais será tanto menor quanto mais alta for a classe de resistência, correspondendo por isso a maiores benefícios económicos na utilização do BAC.

Quadro 5.2 – Composições do betão auto-compactável e do betão convencional utilizadas durante o ensaio à escala real

Composição		Betão Auto-Compactável (BAC)	Betão Convencional (BC)
cimento (CEM I 52.5R)	kg/m³	387	350
fíler calcário (Micro100)		197	85
areia 1		618	407
areia 2		202	413
brita		829	938
água		138	171
superplastificante (V3000)		12.45 ^{a)}	3.70 ^{a)}
água/cimento (w/c)		0.38	0.49
água/total finos (w/p)		0.25	0.40
custo relativo dos materiais		133%	100%

^{a)} O superplastificante utilizado no caso do BAC foi o Viscocrete 3000 da Sika enquanto que no BC foi utilizado um superplastificante de uma outra marca

Os provetes moldados com as composições de BAC e de BC foram desmoldados seis e quatro dias após a betonagem, respectivamente, e mantidos numa câmara de cura a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e com uma humidade relativa de $99\% \pm 1\%$ até à altura do ensaio.

Com o intuito de comparar as propriedades endurecidas do betão das peças com o betão dos provetes moldados, foram retiradas carotes das paredes laterais e laje das duas box-culverts. A extracção de carotes das box-culverts permitiu ainda avaliar os efeitos do uso do sistema CPF nas características do betão endurecido e caracterizar o betão das peças a diferentes alturas detectando a ocorrência de eventuais fenómenos de segregação. Na Figura 5.16 apresentam-se duas fotografias, uma da box-culvert durante a extracção das carotes e uma outra com algumas das carotes extraídas. As box-culvert permaneceram no ambiente da fábrica durante 28 dias e posteriormente foram transportadas para a FEUP onde se procedeu à extracção das carotes. Os ensaios para caracterização do betão das box-culverts foram realizados aos 60 dias de idade.



Figura 5.16 – Box-culvert durante a extracção das carotes e algumas das carotes extraídas

5.4.1 Aferição e comparação das propriedades mecânicas

5.4.1.1 Resistência à compressão

Os ensaios de rotura à compressão simples dos provetes cúbicos e cilíndricos foram realizados segundo o procedimento descrito na norma NP EN 12390-3 (2003) e conforme descrito na secção 4.4.1.1. O valor da massa volúmica do betão e a evolução da resistência à compressão em provetes cúbicos de BAC e de BC é apresentada no Quadro 5.3. Em média, a massa volúmica do betão endurecido ensaiado foi bastante semelhante, sendo de 2361kg/m^3 para o BAC e de 2369kg/m^3 para o BC.

Quadro 5.3 – Resultados do ensaio à rotura por compressão simples dos provetes cúbicos

	Idade do ensaio	Nº de provetes	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$f_{\text{cm, cubos}}$ (MPa)	Coef. Var (δ)	$f_{\text{ck, cubos}}^{\text{a)}}$ (MPa)
BAC	2 dias	3 cubos	2348.6	50.3	2.8%	46.3
	7 dias	6 cubos	2359.3	67.3	4.8%	63.3
	10 dias	6 cubos	2368.6	69.8	6.9%	65.8
	14 dias	6 cubos	2371.3	66.7	8.1%	62.7
	28 dias	6 cubos	2361.5	71.4	7.6%	67.4
BC	2 dias	3 cubos	2375.0	43.6	1.2%	39.6
	7 dias	6 cubos	2365.0	65.3	1.9%	61.3
	10 dias	6 cubos	2361.2	66.5	6.3%	62.5
	14 dias	6 cubos	-	60.3	15.2%	63.3
	28 dias	6 cubos	2374.8	66.3	9.5%	62.6

a) f_{ck} definido segundo o critério 1 da NP EN 206-1: $f_{\text{cm}} \geq f_{\text{ck}} + 4$

Apesar do menor conteúdo em agregado grosso, o BAC exibiu maior resistência à compressão devido à menor razão água/cimento que proporcionou um aumento na densidade da pasta. Alguns dos resultados da resistência apresentam elevados coeficientes de variação, especialmente os que dizem respeito aos provetes de betão convencional, o que pode explicar o facto do valor médio da resistência à compressão não aumentar com a idade. Os elevados valores do coeficiente de variação estão provavelmente associados à utilização de uma amostra de betão em más condições ou no caso do betão convencional pode dever-se a uma compactação imprópria. Em alguns dos provetes de betão convencional foi possível observar claramente a zona de entrada do vibrador, isto é, uma zona central sem agregados grossos (Figura 5.17a), ao contrário da distribuição uniforme de agregados observada nos provetes de BAC, ver (Figura 5.17b). A variabilidade dos resultados exibidos nos provetes da BAC pode também ser explicada pelo conteúdo de ar introduzido durante a betonagem dos provetes.

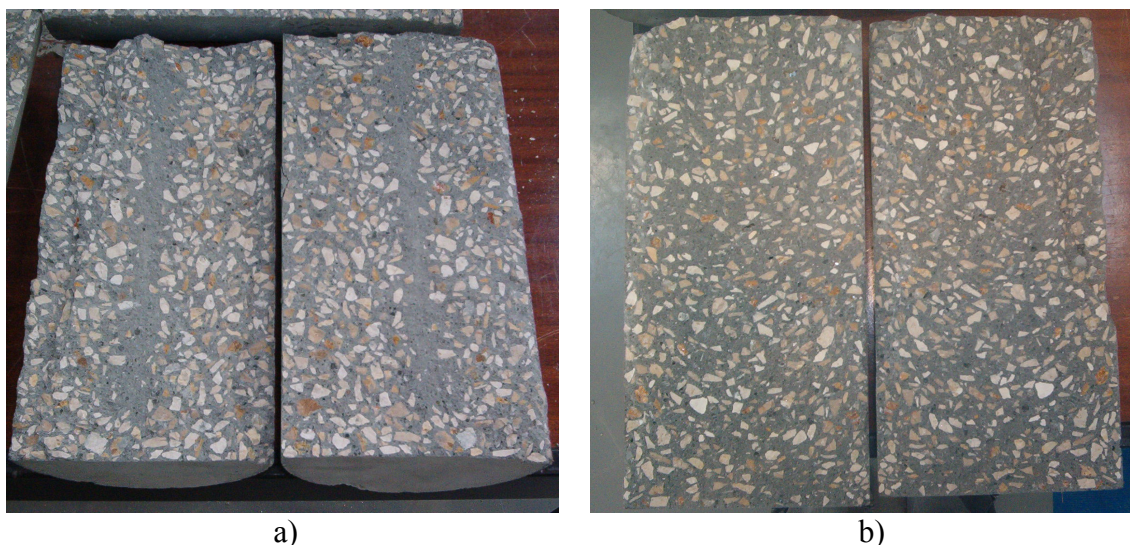


Figura 5.17 – Distribuição dos agregados grossos: a) provete de BC; b) provete de BAC

Além dos provetes cúbicos foram também ensaiados até à rotura por compressão, aos 7 e 28 dias de idade, provetes cilíndricos de BAC e de BC, tendo-se observado, contrariamente ao que seria de esperar, valores superiores aos obtidos para as mesmas idades em provetes cúbicos (Quadro 5.4).

Quadro 5.4 – Resultados do ensaio à rotura por compressão simples em provetes cilíndricos

	Idade do ensaio	Nº de provetes	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$f_{\text{cm, cilindros}}$ (MPa)	Coef. Var (δ)	$f_{\text{ck, cilindros}}^{\text{a)}}$ (MPa)
BAC	7 dias	3 cilindros	2347.5	68.4	1.7%	64.4
	28 dias	2 cilindros	2330.4	76.5	-	72.5
BC	7 dias	3 cilindros	2356.6	61.6	3.6%	57.6
	28 dias	2 cilindros	2330.4	70.4	-	66.4

^{a)} f_{ck} , definido segundo o critério 1 da NP EN 206-1: $f_{\text{cm}} \geq f_{\text{ck}} + 4$

De facto, no caso de betão com resistência à compressão em cilindros superior a 40MPa, estudos conduzidos por diversos investigadores têm indicado que o factor que relaciona a resistência em cubos com a resistência em cilindros não é constante para todas as classes de betão. Muitos investigadores observaram que este factor decresce à medida que a resistência do betão aumenta, isto é, betão de resistência mais elevada é menos influenciado pela forma dos provetes. Segundo *Klug et al.* (2003) esta influência é ainda

menor quando se trata de BAC, podendo o factor que relaciona cilindros com cubos variar entre 0.90 e 1.00.

A avaliação da resistência à compressão do betão das box-culverts foi realizada por meio de carotes extraídas da zona central da laje e da zona central das faces laterais. De salientar, que as carotes retiradas das paredes laterais foram extraídas na direcção horizontal do elemento, pelo que a direcção da carga aplicada foi perpendicular à direcção de betonagem. Pelo contrário, na laje as carotes foram extraídas verticalmente, sendo por isso a direcção de aplicação da carga a mesma que a de betonagem. Embora a norma ASTM C 42 (1999) forneça factores de correcção para converter a resistência das carotes na correspondente resistência dos cilindros standard, estes factores só são aplicáveis para classes de betão inferiores a 42MPa. *Mansur et al. (2002)* propôs um conjunto de relações que relacionam a resistência à compressão em cilindros standard ($d=150\text{mm}$; $h=300\text{mm}$) com a resistência em carotes, aplicáveis para resistências que podem variar de 20 a 100MPa. As equações (5.1) e (5.2) dizem respeito às relações estabelecidas para carotes com $d=100\text{mm}$ e $h=200\text{mm}$ e para carotes com $d=100\text{mm}$ e $h=100\text{mm}$, respectivamente.

$$(f_c)_{150 \times 300} = 0.99(f_c)_{100 \times 200} - 3.495 \quad (5.1)$$

$(f_c)_{150 \times 300}$ - Tensão de rotura à compressão em cilindros de $\Phi=150\text{mm}$ e $h=300\text{mm}$

$(f_c)_{100 \times 200}$ - Tensão de rotura à compressão em cilindros de $\Phi=100\text{mm}$ e $h=200\text{mm}$

$$(f_c)_{150 \times 300} = 0.911(f_c)_{100 \times 100} - 4.752 \quad (5.2)$$

$(f_c)_{150 \times 300}$ - Tensão de rotura à compressão em cilindros de $\Phi=150\text{mm}$ e $h=300\text{mm}$

$(f_c)_{100 \times 100}$ - Tensão de rotura à compressão em cilindros de $\Phi=100\text{mm}$ e $h=100\text{mm}$

As carotes extraídas das box-culverts para determinação da resistência à compressão apresentavam um diâmetro de 94mm e uma relação altura/diâmetro (h/d) que variava entre 1.58 e 1.72. Interpolando as relações estabelecidas por *Mansur et al. (2002)* para $h/d=1$ e $h/d=2$ converteram-se as resistências à compressão das carotes em resistência à compressão dos provetes cilíndricos standard ($d=150$; $h=300\text{mm}$). O valor da resistência em carotes, o valor médio da resistência à compressão convertida e as densidades do betão das carotes são apresentadas no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Resultados do ensaio à rotura por compressão das carotes extraídas da box-culvert betonada com BAC

Referência		h/d	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$f_{\text{ci,carote}}$ (MPa)	$f_{\text{ci,cil}}$ (MPa)	
BAC Parede A	BAC-A-RC1	1,63	2325.5	46.0	40.2*	$\rho_{\text{betão,médio}}=2339$ (1.3%) $f_{\text{cm,cil}}=67.9$ (3.1%)
	BAC-A-RC2	1,61	2391.4	77.7	70.6	
	BAC-A-RC3	1,59	2309.2	72.5	65.4	
	BAC-A-RC4	1,63	2357.3	56.1	49.9*	
	BAC-A-RC5	1,59	2316.6	75.2	68.0	
	BAC-A-RC6	1,60	2335.9	74.6	67.5	
BAC Parede B	BAC-B-RC1	1,64	2358.1	80.9	73.9	$\rho_{\text{betão,médio}}=2329$ (1.2%) $f_{\text{cm,cil}}=70.3$ (4.4%)
	BAC-B-RC2	1,62	2363.8	78.5	71.4	
	BAC-B-RC3	1,59	2307.4	75.2	68.0	
	BAC-B-RC4	1,58	2330.3	79.3	71.9	
	BAC-B-RC5	1,64	2298.8	32.6	27.4*	
	BAC-B-RC6	1,59	2315.1	73.4	66.3	
BAC Laje	BAC-LJ-RC1	1,69	2288.2	78.2	71.7	$\rho_{\text{betão,médio}}=2305$ (0.8%) $f_{\text{cm,cil}}=70.7$ (6.9%)
	BAC-LJ-RC2	1,71	2309.6	76.5	70.1	
	BAC-LJ-RC3	1,69	2295.5	69.2	62.9	
	BAC-LJ-RC4	1,70	2340.6	79.3	72.8	
	BAC-LJ-RC5	1,71	2297.6	82.7	76.1	
	BAC-LJ-RC6	1,72	2299.6	54.5	48.9*	

* Resultados que não foram considerados no cálculo da resistência média à compressão por se tratarem de valores bastante diferentes da média dos restantes valores. Na generalidade dos casos a sua exclusão relacionou-se com defeitos na carote provocada pela carotadora.

Os valores médios da resistência à compressão e massa volúmica das carotes extraídas da box-culvert betonada com BAC foram bastante homogêneos. A massa volúmica média da parede A, parede B e laje foi respectivamente 2339kg/m³, 2329kg/m³ e 2305kg/m³, muito semelhante ao valor médio obtido nos provetes moldados, 2353kg/m³. A média da resistência à compressão em carotes, devidamente afectada do factor de correcção, foi de 69.6MPa, ligeiramente inferior a 76.5MPa, valor médio da resistência em cilindros ensaiados aos 28 dias (Quadro 5.4). Os valores mais baixos da resistência observados nas carotes, quando comparadas com os provetes cilíndricos, podem ser explicados pelas diferentes condições de cura, dado que as box-culvert, ao contrário dos provetes, foram curadas em ambiente seco.

Quadro 5.6 – Resultados do ensaio à rotura por compressão das carotes extraídas da box-culvert betonada com BC

Referência		h/d	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$f_{\text{ci,carote}}$ (MPa)	$f_{\text{ci,cil}}$ (MPa)	
BC Parede A	BC-A-RC1	1,63	2332.6	75.4	68.4	$\rho_{\text{betão,médio}}=2380$ (2.0%) $f_{\text{cm,cil}}= 67.5$ (2.2%)
	BC-A-RC2	1,61	2367.0	76.7	69.8	
	BC-A-RC3	1,59	2471.8	75.3	68.1	
	BC-A-RC4	1,63	2355.0	71.8	65.3	
	BC-A-RC5	1,59	2367.7	73.5	66.9	
	BC-A-RC6	1,60	2389.5	72.8	66.4	
BC Parede B	BC-B-RC1	1,64	2232.4	65.9	59.5	$\rho_{\text{betão,médio}}=2345$ (2.8%) $f_{\text{cm,cil}}= 66.3$ (6.0%)
	BC-B-RC2	1,62	2371.6	75.9	68.7	
	BC-B-RC3	1,59	2371.2	72.1	65.1	
	BC-B-RC4	1,58	2321.0	74.8	68.1	
	BC-B-RC5	1,64	2354.7	74.1	67.4	
	BC-B-RC6	1,59	2422.9	75.9	69.1	
BC Laje	BC-LJ-RC1	1,69	2305.3	64.5	58.3	$\rho_{\text{betão,médio}}=2289$ (0.6%) $f_{\text{cm,cil}}= 58.2$ (8.6%)
	BC-LJ-RC2	1,71	2288.5	65.3	59.0	
	BC-LJ-RC3	1,69	2287.7	56.7	50.6	
	BC-LJ-RC4	1,70	2274.8	63.0	56.9	
	BC-LJ-RC5	1,71	2274.1	71.1	64.6	
	BC-LJ-RC6	1,72	2303.4	66.0	59.7	

No caso das carotes extraídas da box-culvert betonada com BC, os valores observados para a resistência à compressão e massa volúmica na parede A e parede B são bastante próximos e muito semelhantes aos obtidos nos provetes moldados, em que os respectivos valores médios foram de 70.4MPa e 2380kg/m³. Pelo contrário, as carotes extraídas da laje da box-culvert apresentam valores mais baixos, quer para a massa volúmica (2289kg/m³) como para a resistência à compressão (58.2MPa). Atendendo aos resultados apresentados poder-se-á dizer que o BAC revelou-se um material mais homogéneo e isotrópico ao longo de toda a box-culvert.

Na prática, as propriedades mecânicas e de durabilidade, dependem da selecção de materiais, da composição de betão, assim como do grau de supervisão durante os processos de colocação, compactação, acabamento e cura. A falta de compactação devido a dificuldades de vibração em locais apertados ou de difícil acesso tem vindo a ser reconhecida como o factor chave para a falta de homogeneidade exibida pelas estruturas de betão. O betão convencional requer compactação por via da vibração mecânica, o que constitui um processo descontínuo. No caso da vibração interna, mesmo quando correctamente executada, o volume de betão que está sob a área de influência do vibrador

não recebe igual energia de compactação, e no caso da vibração externa, o resultado da compactação é muito heterogêneo, dependendo da distância ao local da vibração. O resultado da vibração é em geral um betão com compactação desigual (ninhos de brita, segregação) e consequentemente com diferentes propriedades mecânicas e de durabilidade. O betão auto-compactável dotado das propriedades adequadas não necessita de vibração, o que reflecte o seu potencial para reduzir a variabilidade das características do betão ao longo da estrutura, fazendo dele um material mais homogêneo e isotrópico (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005).

5.4.1.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do betão foi avaliado segundo o procedimento descrito na especificação do LNEC E397 (1993) e conforme descrito na secção 4.4.1.2. O Quadro 5.7 apresenta os resultados do módulo de elasticidade, em diferentes idades, avaliado em provetes cilíndricos de BAC e BC. Analisando os resultados verifica-se que o valor do módulo de elasticidade evolui pouco ao longo do tempo e que aos 28 dias o seu valor nos provetes de BAC e BC é semelhante, 44.9GPa e 43.1GPa, respectivamente.

Quadro 5.7 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade realizado em provetes cilíndricos

	Idade do ensaio	Nº de provetes	E_{cm} (GPa)	Coef. Var (δ)
BAC	7 dias	3 cilindros	41.5	1.2%
	10 dias	3 cilindros	43.0	1.3%
	14 dias	2 cilindros	43.0	-
	28 dias	3 cilindros	44.9	0.8%
BC	7 dias	3 cilindros	42.9	0.7%
	10 dias	3 cilindros	42.7	2.0%
	14 dias	3 cilindros	42.3	2.3%
	28 dias	3 cilindros	43.1	1.5%

Para avaliar o valor do módulo de elasticidade das peças betonadas na fábrica foram extraídas carotes de 94mm de diâmetro da laje das box-culverts. A medição da deformação produzida nas carotes por aplicação do carregamento, foi realizada com recurso a três extensómetros de resistência eléctrica colados no betão, conforme se pode observar na Figura 5.18. Os extensómetros foram colocados no terço central da altura das carotes e dispostos com igual espaçamento ao longo do seu perímetro.



Figura 5.18 – Carotes instrumentadas com extensómetros para a determinação do módulo de elasticidade

Observando os valores do módulo de elasticidade obtidos nas carotes de BAC e de BC verifica-se que são ligeiramente inferiores, em cerca de 3GPa, aos obtidos nos provetes cilíndricos (Quadro 5.8). O valor do módulo de elasticidade é extremamente influenciável pela presença de pequenas fissuras, muitas vezes provocadas pela caroteadora durante a operação de extracção da carote, e no caso de se utilizar extensómetros de colar no betão, também pela eficiência da sua colagem. No caso do betão convencional este decréscimo no valor do módulo de elasticidade já seria de esperar, atendendo aos resultados da resistência à compressão obtida nas carotes retiradas da laje da box-culvert.

Quadro 5.8 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade realizado em carotes extraídas das box-culverts betonadas com BAC e com BC

	Referência	E_{ci} (GPa)	E_{cm} (GPa)	Coef. Var (δ)
BAC Laje	BAC-LJ-RC1	44,2	42,2	4,65%
	BAC-LJ-RC4	40,3		
	BAC-LJ-RC5	41,9		
BC Laje	BC-LJ-RC2	39,7	40,4	-
	BC-LJ-RC3	30,6*		
	BC-LJ-RC5	40,1		

* Resultado que não foi considerado no cálculo do módulo de elasticidade médio por se tratar de um valor bastante diferente da média dos restantes valores. Ao inspeccionar a carote foi detectada alguma fissuração, que terá sido provocada pela caroteadora.

5.4.1.3 Resistência à tracção

A resistência à tracção do betão produzido na MAPREL em Rio Maior foi avaliada de duas formas indirectas: através do ensaio de rotura por compressão linear, em cilindros, e através do ensaio de rotura por flexão, em prismas. O procedimento utilizado para determinar a resistência à tracção por compressão linear seguiu o descrito na norma NP EN 12390-6 (2003) e a indicações apresentadas na secção 4.4.1.3. No Quadro 5.9 são apresentados os valores médios da resistência à tracção por compressão linear, verificando-se, tal como tinha sucedido na composição da MAPREL Nelas, que a resistência à tracção do BAC é superior à do BC.

Quadro 5.9 – Resultados do ensaio de rotura por compressão diametral

	Idade do ensaio	Nº de provetes	$\rho_{\text{betão}}$ (kg/m ³)	$F_{\text{máx}}$ (MPa)	$f_{\text{ct,spli}}$ (MPa)	Desvio Padrão (δ)
BAC	7 dias	3 cilindros	2346.1	311.8	4.4	18.9%
	10 dias	3 cilindro	2352.9	406.7	5.8	3.4%
	14 dias	3 cilindro	2351.7	397.7	5.7	3.8%
	28 dias	3 cilindro	2345.7	406.9	5.8	5.9%
BC	7 dias	3 cilindros	2374.0	342.8	4.9	1.9%
	10 dias	3 cilindro	2363.8	336.9	4.8	8.8%
	14 dias	3 cilindro	2379.4	336.8	4.8	18.3%
	28 dias	3 cilindro	2378.0	346.1	4.9	11.4%

A determinação da resistência à tracção por flexão em provetes prismáticos pode ser realizada utilizando dois sistemas de carga distintos: uma carga concentrada a meio vão, que origina um diagrama triangular de momentos, ou duas cargas iguais e simétricas, que produzem um momento flector constante entre elas. A tensão de rotura avaliada em ensaios de flexão é mais fácil de realizar do que os ensaios de tracção directa, mas com os inconvenientes da tensão de rotura assim determinada depender da relação entre a altura e o vão do prisma e da distribuição de momentos (Coutinho e Gonçalves, 1994). Neste trabalho foi utilizado um sistema de duas cargas, conforme se pode observar na Figura 5.19a aplicando-se um tipo de carregamento como o apresentado na Figura 5.19b e seguindo as recomendações da NP EN 12390-5 (2003).

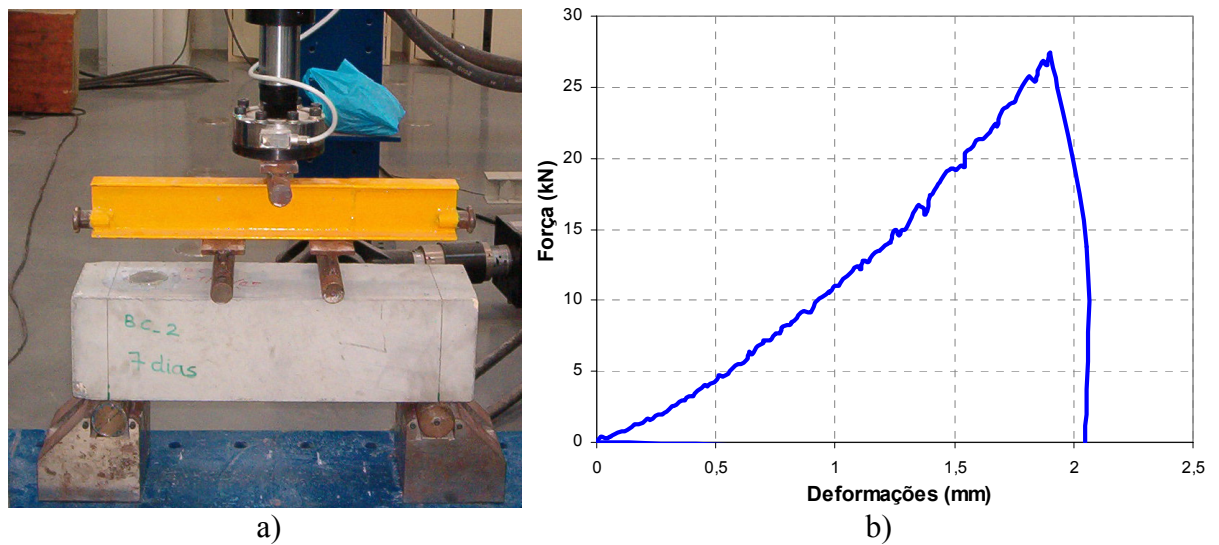


Figura 5.19 – a) Esquema do ensaio de rotura à tracção em flexão; b) Evolução da carga aplicada durante o ensaio de rotura à tracção em flexão

Considerando um prisma sujeito a duas cargas iguais e espaçadas de uma distância I , a resistência à flexão é dada pela Equação (5.3). Os resultados da força máxima atingida durante o ensaio ($F_{\text{máx}}$) bem como o valor médio da resistência à tracção por flexão em prismas, encontram-se resumidos no Quadro 5.10. Estes resultados demonstram mais uma vez a maior resistência à tracção exibida pelo BAC, embora de forma menos evidente do que no ensaio de rotura por compressão linear.

$$f_{ct,fl} = \frac{F \times I}{d_1 \times d_2^2} \quad (5.3)$$

Onde $f_{ct,fl}$ representa a resistência à tracção por flexão (MPa), F é a força máxima atingida durante o ensaio (N), I a distância entre os roletes inferiores de apoio (mm), d_1 a largura do provete (mm) e d_2 a altura do provete (mm).

Quadro 5.10 – Resultados do ensaio de rotura por flexão

	Idade do ensaio	Nº de provetes	$F_{max,m}$ (kN)	$f_{ct,fl}$ (MPa)
BAC	7 dias	2 prismas	32.4	4.3
	14 dias	2 prismas	37.7	5.0
	28 dias	2 prismas	37.4	5.0
BC	7 dias	2 prismas	31.7	4.2
	14 dias	2 prismas	32.9	4.4
	28 dias	2 prismas	33.5	4.6

5.4.2 Aferição e comparação das propriedades de durabilidade

5.4.2.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade das composições de BAC e de BC foi avaliada de acordo com a recomendação da RILEM TC 116-PCD (1999) e conforme indicado na secção 4.4.2.1. Para a realização deste ensaio foram cortadas de cada cubo duas fatias de 5cm de espessura de cubos com 150mm de aresta. Em contacto com a água foram colocadas as faces moldadas, perpendiculares à face de enchimento. No Quadro 5.11 sumariam-se os resultados do ensaio de absorção por capilaridade realizado aos 28 dias, apresentando-se o coeficiente de absorção (S), o valor da água absorvida inicialmente pelos poros (a_0) e o coeficiente de correlação obtido por ajuste dos resultados a uma recta.

Quadro 5.11 – Valores de S, a_0 e R^2 do ensaio de absorção capilar

Provetes	BAC			BC		
	S	a_0	R^2	S	a_0	R^2
	$g/(m^2 \times min^{1/2})$	g/m^2		$g/(m^2 \times min^{1/2})$	g/m^2	
1_A	17.90	88.96	0.981	24.60	75.66	0.994
1_C	19.60	111.60	0.975	25.77	57.89	0.997
2_A	20.40	98.43	0.979	24.12	52.24	0.995
2_C	20.21	85.27	0.982	24.64	71.32	0.994
3_A	19.82	92.07	0.979	25.76	60.05	0.996
3_C	19.40	109.38	0.970	21.74	80.94	0.992
Média(c.v.)	$S = 19.55 g/(m^2 \times min^{1/2})$ ($\delta=5.0\%$)			$S = 24.44 g/(m^2 \times min^{1/2})$ ($\delta=6.0\%$)		

O valor médio do coeficiente de absorção medido aos 28 dias nos provetes de BAC e de BC foi de $19.55 g/(m^2 \times min^{1/2})$ e $24.44 g/(m^2 \times min^{1/2})$, respectivamente. Atendendo a que

quanto menor for o valor deste coeficiente, melhor a qualidade do betão das camadas superficiais, poderá concluir-se que o BAC apresenta uma microestrutura mais densa com menor conectividade entre poros, perspectivando-se um betão mais durável.

Para a determinação da absorção de água por capilaridade do betão das box-culvert foram utilizadas carotes de 75mm de diâmetro extraídas das paredes A e B de cada uma das box-culverts. Em cada carote cortaram-se dois discos de cerca de 5cm de espessura, um junto da face onde foi aplicado CPF e o outro junto da face moldada sem CPF (Figura 5.20). Refira-se que segundo o documento da RILEM (TC116-PCD, 1999) a área de ensaio mínima recomendada é de 17500mm^2 , enquanto que os provetes utilizados possuem uma área de ensaio de 4418mm^2 .

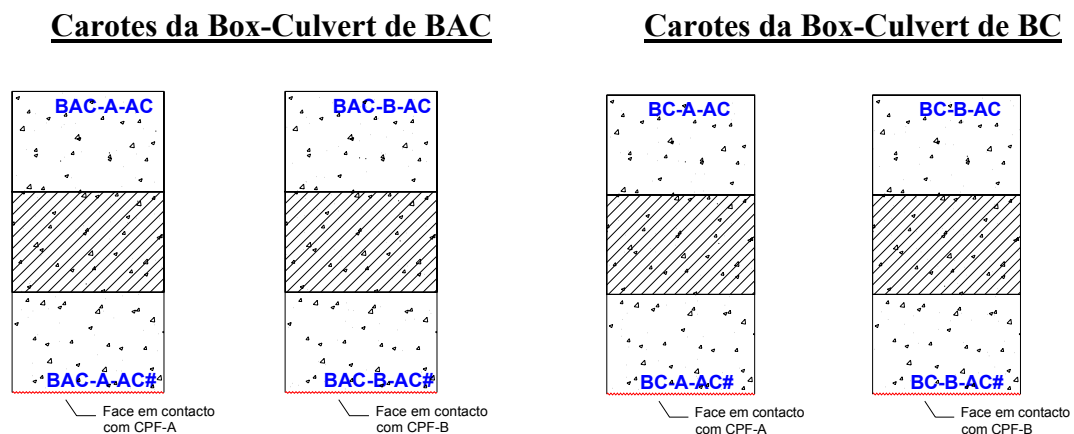


Figura 5.20 – Esquema ilustrativo da posição das amostras utilizadas no ensaio

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade (S , a_0 , R^2) das carotes extraídas das box-culverts, nas paredes com e sem CPF, assim como as melhorias observadas quando é utilizado o sistema CPF, podem ser observados de forma resumida no Quadro 5.12. O valor médio do coeficiente de absorção medido nas amostras de BAC sem CPF, amostras da parede A e B, foi de $49.89\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2})$, enquanto que nas amostras de BC sem CPF foi de $72.67\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2})$. Estes resultados são bastantes superiores aos obtidos nas provetes cúbicos, $19.55\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2})$ e $24\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{1/2})$ para o BAC e BC, respectivamente, continuando contudo a observar-se características melhoradas no BAC relativamente à absorção de água. As diferenças observadas na absorção dos provetes e das carotes pode em parte ser explicada pelas diferentes condições de cura.

A utilização do sistema CPF nas cofragens diminuiu consideravelmente a absorção de água por capilaridade, quer nas amostras de BAC como nas de BC, embora se verifique

um ganho ligeiramente superior no caso da sua utilização na box-culvert betonada com BAC. Analisando a última coluna do quadro verifica-se ainda que o sistema CPF-B, constituído por um filtro/dreno formado por um textil colado a uma geogrelha, revelou-se mais eficaz relativamente à absorção de água.

Quadro 5.12 – Valores de S , a_0 e R^2 do ensaio de absorção capilar das carotes extraídas das box-culverts

Provetes			S (g/(m ² ×min ^{1/2}))	a_0 (g/m ²)	R^2	Eficácia do CPF ^{a)}
BAC	A com CPF	3 amostras	45.07 ($\delta=4.8\%$)	261.51	0.980	14.9%
	A sem CPF	3 amostras	52.94 ($\delta=10.2\%$)	220.03	0.985	
	B com CPF	2 amostras	38.44 ($\delta=--\%$)	273.28	0.979	17.9%
	B sem CPF	3 amostras	46.84 ($\delta=0.1\%$)	367.47	0.977	
BC	A com CPF	3 amostras	69.60 ($\delta=7.5\%$)	280.73	0.993	8.5%
	A sem CPF	3 amostras	76.04 ($\delta=2.8\%$)	259.48	0.987	
	B com CPF	2 amostras	60.73 ($\delta=--\%$)	130.47	0.992	12.4%
	B sem CPF	2 amostras	69.30 ($\delta=--\%$)	291.91	0.985	

a) A percentagem de eficácia de aplicação do sistema CPF foi calculada com base nos valores do coeficiente de absorção capilar

5.4.2.2 Profundidade de penetração da água sob pressão

O ensaio de penetração de água sob pressão foi realizado em dois cubos de BAC e em dois cubos de BC, seguindo a norma NP EN 12390-8 (2003). À semelhança do que ocorreu nos ensaios de absorção por capilaridade e de penetração de cloretos, o BAC apresenta uma profundidade de penetração bastante menor que o BC, denotando uma maior compacidade do betão da camada de recobrimento (Quadro 5.13).

Quadro 5.13 – Resultados do ensaio de penetração da água sob pressão realizado em provetes

Provetes		Profundidade máxima de penetração
BAC	PA_1	6.0mm
	PA_2	4.0mm
	<i>Média</i>	<i>5.0mm</i>
BC	PA_1	16.0mm
	PA_2	19.0mm
	<i>Média</i>	<i>17.5mm</i>

5.4.2.3 Resistência à penetração dos cloretos

A resistência à penetração dos cloretos foi avaliada através do ensaio de determinação rápida da permeabilidade do betão aos cloretos regulamentado pela ASTM C 1202-94 (*ensaio de Coulomb*) e através do método rápido CTH descrito na especificação do LNEC E 463 (2004). Os ensaios foram realizados em discos de aproximadamente 5cm de espessura e 10cm de diâmetro obtidos a partir de carotes extraídas de provetes cúbicos moldados com BAC e BC. No Quadro 5.14 apresentam-se os resultados obtidos para os dois tipos de betão em ambos os ensaios.

Quadro 5.14 – Resultados obtidos no ensaio de Coulomb e no ensaio CTH

	Provetes	Carga total passada (Coulombs)	Provetes	Resistividade ($\Omega.m$)	Coefficiente de difusão ($D_{ns}.m^2/s$)
BAC	CL1_A	2192	CL1_C	78.9	9.40×10^{-12}
	CL2_A	2746	CL2_C	85.8	11.4×10^{-12}
	CL3_A	3265	CL3_C	92.5	7.04×10^{-12}
	CL4_A	2981	CL4_C	83.4	10.5×10^{-12}
	CL5_A	2580	CL5_C	89.4	7.94×10^{-12}
	Média(c.v.)	2753 ($\delta=14.7\%$)	Média(c.v.)	86.6 (12.6%)	9.26×10^{-12} (19.0%)
BC	CL1_A	4023	CL1_C	78.9	14.1×10^{-12}
	CL2_A	4704	CL2_C	57.4	14.7×10^{-12}
	CL3_A	5312	CL3_C	56.0	14.8×10^{-12}
	CL4_A	5531	CL4_C	57.9	15.8×10^{-12}
	CL5_A	4455	CL5_C	76.0	12.3×10^{-12}
	Média(c.v.)	4805 ($\delta=13.0\%$)	Média(c.v.)	61.2 (13.6%)	14.3×10^{-12} (9.0%)

Os resultados de ambos os ensaios encontram-se em consonância revelando uma maior resistência à penetração de cloretos por parte do BAC, isto é, uma carga total passada (coulombs) e um coeficiente de difusão menores. Segundo a classificação apresentada na norma ASTM C1202-94, a composição de BAC tem uma penetração aos cloretos média enquanto que a composição de betão convencional exhibe uma elevada penetrabilidade a iões cloretos. Os resultados da resistividade medidos durante o ensaio CTH vêm, também eles, comprovar estas conclusões. A menor razão w/c, o maior conteúdo em ultrafinos e a boa dispersão das partículas de cimento e filler proporcionada pelo superplastificante, podem justificar o melhor comportamento do BAC. O conjunto destes factores contribui para que o BAC apresente uma microestrutura mais compacta e homogénea.

Utilizando os mesmos ensaios avaliou-se a resistência à penetração de cloretos do betão das box-culverts. Para a realização destes ensaios utilizaram-se discos de 10cm de diâmetro e 5cm de espessura, obtidos a partir das faces moldadas das carotes extraídas das box-culvert (conforme indica a Figura 5.20).

Quadro 5.15 – Resultados obtidos no ensaio de Coulomb e no ensaio CTH das carotes extraídas das box-culverts

	Provetes	Carga total passada (Coulombs)	Provetes	Resistividade ($\Omega.m$)	Coefficiente de difusão ($D_{ns}.m^2/s$)	Eficácia do CPF ^{a)}
BAC	A com CPF (4 amostras)	2534 (4.6%)	A com CPF (4 amostras)	113.5 (7.1%)	9.64×10^{-12} (6.9%)	4.0%
	A sem CPF (4 amostras)	3068 (5.9%)	A sem CPF (4 amostras)	98.9 (12.3%)	10.0×10^{-12} (23.2%)	
	B com CPF (4 amostras)	2648 (3.3%)	B com CPF (4 amostras)	106.1 (4.4%)	9.62×10^{-12} (8.8%)	15.8%
	B sem CPF (4 amostras)	3191 (6.6%)	B sem CPF (4 amostras)	92.1 (9.2%)	11.40×10^{-12} (9.9%)	
BC	A com CPF (3 amostras)	3915 (6.4%)	A com CPF (4 amostras)	63.4 (8.4%)	15.00×10^{-12} (4.3%)	6.3%
	A sem CPF (3 amostras)	4218 (5.0%)	A sem CPF (3 amostras)	58.8 (2.9%)	16.00×10^{-12} (2.0%)	
	B com CPF (4 amostras)	3868 (8.8%)	B com CPF (3 amostras)	69.2 (4.6%)	13.60×10^{-12} (5.4%)	12.8%
	B sem CPF (4 amostras)	4284 (11.6%)	B sem CPF (4 amostras)	62.3 (5.8%)	15.60×10^{-12} (4.7%)	

a) A percentagem de eficácia de aplicação do sistema CPF foi calculada com base nos valores do coeficiente de difusão

Analisando os resultados anteriores referentes ao betão das paredes das box-culverts com e sem CPF, verifica-se que, tal como se havia observado nos ensaios realizados a partir dos provetes cúbicos, o BAC apresenta uma maior resistência à penetração de cloretos do que o BC (Quadro 5.15). Por outro lado, e ao contrário do que sucedeu com absorção de água por capilaridade, os valores médios do coeficiente de difusão obtidos em provetes cúbicos são bastante semelhantes aos observados nas carotes, $9.26 \times 10^{-12} m^2/s$ e $10.17 \times 10^{-12} m^2/s$ respectivamente, para o BAC, e $14.3 \times 10^{-12} m^2/s$ e $15.05 \times 10^{-12} m^2/s$ respectivamente, para o BC. No que diz respeito ao sistema CPF, tal como se tinha verificado no ensaio de absorção de água, a sua utilização proporcionou melhorias no comportamento do betão de recobrimento à penetração de cloretos. O sistema CPF-B mostrou-se mais eficaz do que o sistema CPF-B, mas não existindo grandes diferenças na sua eficiência quando se utiliza o BAC ou o BC.

5.4.2.4 Resistência à carbonatação

A resistência à carbonatação das box-culverts betonadas com BAC e BC foi avaliada de acordo com o procedimento descrito na Especificação E 391 (1993) e conforme indicado na secção 4.4.2.3. Os ensaios foram realizados em discos de 94mm de diâmetro e 5cm de altura obtidos a partir de carotes extraídas das box-culverts (conforme indica a Figura 5.20). Após 7 meses de exposição os provetes foram abertos e tratados com fenolftaleína para que se tornasse visível a profundidade de carbonatação. Os valores da profundidade média de carbonatação (d_k) e da profundidade máxima de carbonatação ($d_{k,max}$) das carotes extraídas das paredes com e sem CPF das box-culverts de BAC e de BC são apresentados no Quadro 5.16.

Quadro 5.16 – Resultados obtidos no ensaio de Coulomb e no ensaio CTH das carotes

	Provetes	Profundidade média d_k	Profundidade máxima $d_{k,max}$	% Eficácia do CPF ^{a)}
BAC	A com CPF (3 amostras)	4.0mm	7.3mm	41.2%
	A sem CPF (3 amostras)	6.8mm	13.3mm	
	B com CPF (2 amostras)	5.0mm	8.0mm	43.2%
	B sem CPF (2 amostras)	8.8mm	13.5mm	
BC	A com CPF (0 amostras)	--	--	--
	A sem CPF (3 amostras)	8.6mm	12.4mm	
	B com CPF (2 amostras)	4.5mm	8.5mm	55.0%
	B sem CPF (2 amostras)	10.0mm	14.0mm	

^{a)} A percentagem de eficácia de aplicação do sistema CPF foi calculada com base nos valores da profundidade média de carbonatação

Analisando os resultados anteriores verifica-se que existem melhorias significativas nas características da camada superficial de betão quando é utilizado o sistema CPF, contudo parece existir uma maior eficiência deste sistema quando aplicado em betão convencional. Uma comparação dos valores obtidos nas amostras de BAC e de BC, ambos sem CPF, revela um comportamento muito semelhante destes dois betões, embora ligeiramente melhor no caso do BAC.

5.5 ROBUSTEZ DA COMPOSIÇÃO

Apesar das inúmeras vantagens que decorrem da utilização do BAC na indústria da pré-fabricação, a auto-compactabilidade não se alcança através de uma receita simples, fácil de se reproduzir de uma central de produção para outra. Uma das dificuldades encontradas durante esta experiência à escala real prendeu-se com a necessidade de manter as propriedades de auto-compactabilidade perante as variações que iam ocorrendo nos materiais. Observou-se que pequenos desvios nas pesagens dos materiais ou alterações na humidade dos agregados, podem causar grandes variações nas propriedades frescas do BAC.

De uma forma geral a robustez das misturas pode ser afectada pelas variações nas características dos materiais, por desvios da central durante a pesagem dos materiais, por variações das condições ambientais e pela evolução das características do betão ao longo do tempo, embora este não seja um aspecto crítico no caso da pré-fabricação. Torna-se por isso importante obter uma composição de BAC robusta, ou seja, uma composição “insensível”, tanto quanto possível, a estas variações. O betão auto-compactável é uma tecnologia inovadora na indústria do betão e cujo sucesso depende em parte da sua robustez, pelo que a avaliação desta característica deve constituir um dos critérios de tomada de decisão entre diferentes composições de BAC (Nunes, Figueiras *et al.*, 2006a). A maior robustez de uma composição garante por um lado, o cumprimento das exigências em termos de auto-compactabilidade e por outro lado, promove uma maior homogeneidade das suas propriedades endurecidas, mecânicas e de durabilidade.

Na Figura 5.21 apresentam-se duas curvas relativas ao funcionamento de dois processos distintos. Neste caso simples, em que existe apenas uma variável de resposta (Y) e uma variável independente (X), por observação da figura conclui-se que o processo A é mais “robusto” que o processo B. Ou seja, o processo A permite variações maiores de X em torno do ponto central, enquanto mantém a resposta dentro do intervalo de aceitação. Nestas condições, para aumentar a robustez do processo B, seria necessário estreitar o intervalo $[X_{\min}; X_{\max}]$, introduzindo alterações ao nível do controle de qualidade, do funcionamento dos equipamentos existentes, etc. Este tipo de alterações são, regra geral, difíceis de implementar e dispendiosas e, por isso, interessa procurar o processo mais robusto para as condições existentes, neste caso a composição mais robusta. No processo de produção de betão existe um número elevado de variáveis que influenciam o seu comportamento ($X=X_i$, $i=1\dots n$) e é necessário controlar um número considerável de propriedades do betão ($Y=Y_i$, $i=1\dots m$) para comprovar o desempenho do material (Nunes, Figueiras *et al.*, 2006a).

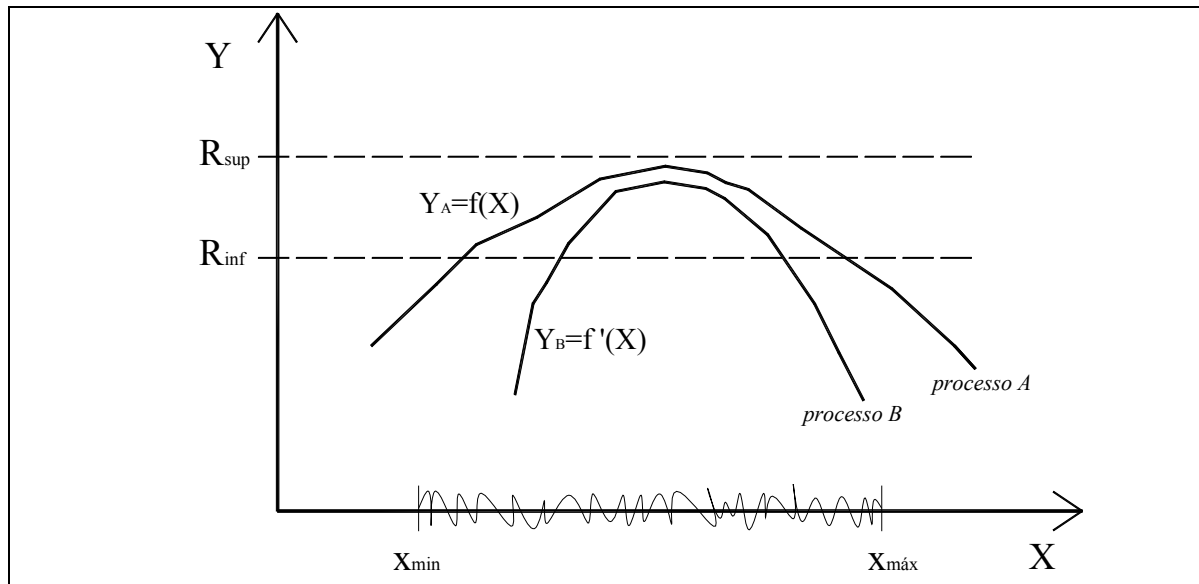


Figura 5.21 – Comparação entre a “robustez” de dois processos distintos
(Nunes, Figueiras *et al.*, 2006a)

Baseado nas recomendações da *EFANARC* (2005) a definição de robustez pode ser generalizada como a capacidade do betão para manter as propriedades requeridas (propriedades do fresco e endurecido, incluindo de durabilidade) quando ocorrem pequenas variações nas propriedades ou quantidades dos materiais constituintes. Segundo a “*The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*” (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005) a verificação da robustez deve consistir um importante passo no processo de concepção de composições de BAC. Atendendo a que a maior parte da variabilidade dos materiais constituintes pode ser traduzida numa alteração da necessidade de água, é sugerido pela *BIBM et al.* (2005) que a avaliação da robustez seja testada mediante as alterações nas propriedades do estado fresco, em composições com mais e menos 5 a 10 litros do conteúdo de água da composição base. Um betão auto-compactável robusto deve tolerar estes desvios, isto é, deve manter as propriedades do fresco e endurecido dentro dos limites especificados (BIBM, CEMBUREAU *et al.*, 2005). Contudo, este tipo de avaliação é bastante simplista uma vez que não entra em linha de conta com as características específicas da central de produção, tal como, o nível de controlo de qualidade existente, o desempenho dos equipamentos, aptidão e conhecimento dos trabalhadores.

Uma abordagem mais correcta, quando estão envolvidos vários parâmetros, consiste em conduzir as experiências segundo um plano factorial (Nunes, Figueiras *et al.*, 2006a). Partindo das experiências programadas através do plano factorial, realiza-se uma análise estatística dos dados recolhidos e ajustam-se modelos numéricos para descrever diferentes

propriedades do BAC, nos estados fresco e endurecido. Estes modelos numéricos, estabelecidos da igual forma que os modelos utilizados no Dimensionamento experimental apoiado na estatística (ver Capítulo 3), permitem simular a variação das propriedades do betão quando ocorrem por exemplo desvios na pesagem dos materiais.

Numa última fase procura-se definir uma medida que possa ser utilizada para avaliar a robustez da composição de BAC. A robustez depende do tipo de variação que ocorre em cada uma das variáveis, pelo que é necessário observar e analisar os desvios reais que ocorrem ao longo de todo o processo de produção do betão. Assim, partindo dos modelos numéricos ajustados para as propriedades relevantes do BAC e das variações dos parâmetros da mistura, simulados com base nas flutuações diárias que ocorrem na produção da composição em estudo, determina-se a frequência com que as propriedades das misturas simuladas caiem dentro dos intervalos de aceitação (Equação 5.4). O valor f representa a probabilidade de todas as respostas (propriedades do BAC em estudo) caírem, simultaneamente, dentro dos respectivos intervalos de aceitação ($[R_{inf}^i; R_{sup}^i]$). As propriedades do BAC são simuladas aplicando a técnica de reamostragem de *bootstrap* aos dados originais permitindo determinar com maior exactidão da medida de robustez proposta. A aplicação desta metodologia para avaliação da robustez das composições pode ser consultada em (Nunes, Figueiras *et al.*, 2006a; 2006b). O cálculo desta medida tem um interesse particular quando se pretende seleccionar, de uma forma bem fundamentada, uma de duas (ou mais) composições alternativas para a mesma aplicação.

$$f = \frac{n^{\circ} \text{ de ocorrências do evento } \left(\bigcap_{i=1}^n R_{inf}^i < y_i > R_{sup}^i \right)}{\text{tamanho da amostra}} \quad (5.4)$$

No início de um estudo deste tipo é importante seleccionar criteriosamente as variáveis independentes, as propriedades relevantes a analisar (nos estados fresco e/ou endurecido) e os respectivos limites para os intervalos de aceitação, uma vez que estas opções vão condicionar o valor final da “robustez”.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Ao longo desta dissertação foi exposto de forma detalhada o trabalho desenvolvido tendo em vista os objectivos estabelecidos. Como ponto de partida, para este trabalho, foram colocados quatro objectivos principais: aplicação e avaliação de metodologias simples para dimensionamento de composições de betão auto-compactável; avaliar a adequabilidade dos processos produtivos correntes de amassadura, transporte e colocação do betão para a aplicação do BAC na pré-fabricação; aferir e comparar o desempenho, em termos de propriedades do betão endurecido, entre o BAC e o betão convencional; avaliar e comparar a eficácia da aplicação do sistema CPF em peças betonadas com BAC relativamente à sua utilização em peças de betão convencional. Nesta secção realiza-se uma sinopse das principais conclusões, salientando os aspectos de maior relevância.

6.1.1 Metodologias para dimensionamento de composições de BAC

A impossibilidade de utilizar os métodos tradicionais de estudo de composições e as limitações apresentadas pelos métodos existentes fomentaram o desenvolvimento de novas metodologias de dimensionamento de composições de BAC, que permitissem por um lado, a utilização da generalidade dos materiais presentes no mercado Português e, por outro lado, alcançar composições económicas e robustas. Ao longo deste trabalho apresentaram-se duas metodologias distintas, o *Método proposto pela FEUP* baseado em procedimentos e equipamentos simples e o *Dimensionamento experimental apoiado na estatística*.

Utilizando como base o método de *Okamura* e a experiência adquirida anteriormente, desenvolveu-se um método simples de definição de composições de betão auto-compactável baseado num procedimento de tentativa-erro, mas de uma forma guiada, permitindo na generalidade dos casos chegar rapidamente a uma composição de BAC que cumpra os requisitos do estado fresco e endurecido. Apesar de apenas ter sido apresentado um caso de aplicação, a metodologia foi utilizada igualmente com sucesso, em composições com requisitos de desempenho e materiais constituintes distintos. Como principal vantagem desta metodologia destaca-se a sua simplicidade, o que torna relativamente fácil a sua implementação na indústria do betão. Por outro lado, o facto de não se estabelecer um único ponto óptimo para as propriedades da argamassa fresca, tal como sucede no método de *Okamura et al.*, mas uma área dentro da qual se considera que a argamassa possui as propriedades adequadas, conduz a composições mais económicas. A sua maior limitação reside na forma como é determinada a relação entre as areias que, no caso do *Método proposto pela FEUP*, se define através de ensaios em argamassa sem que seja considerado o conjunto de agregados utilizados na composição, isto é, areias e brita.

No estudo das pastas, paralelamente aos ensaios de espalhamento e fluidez foi realizado um conjunto de ensaios reológicos que permitiram por um lado, comparar resultados e por outro lado, conhecer o comportamento das pastas para uma gama alargada de taxas de deformação. Os ensaios reológicos, apesar de pouco divulgados ao nível da indústria da construção, demonstraram ser uma mais valia significativa na caracterização e formulação das novas classes de betões, tais como o BAC.

A segunda metodologia de dimensionamento proposta neste trabalho utiliza um conjunto de ferramentas estatísticas que permitem definir modelos matemáticos que descrevem a influência dos parâmetros da composição nas variáveis de resposta escolhidas, propriedades frescas e endurecidas do BAC. Os modelos numéricos são estabelecidos com base num conjunto de composições realizadas em laboratório e programadas segundo um plano factorial. A utilização desta ferramenta permite retirar informação de boa qualidade e abranger a generalidade dos efeitos entre os parâmetros, efeitos isolados e de interacção. Assim, estabelecidos os modelos numéricos para o conjunto de materiais seleccionados, facilmente se podem definir diferentes composições de betão consoante os requisitos de desempenho exigidos. A principal limitação do dimensionamento experimental estatístico reside no facto dos modelos estabelecidos serem válidos apenas para o conjunto de materiais seleccionados, pelo que uma alteração nas suas características exige a definição de novos modelos.

6.1.2 Adequabilidade dos processos produtivos correntes de amassadura, transporte e colocação do betão para a aplicação do BAC na indústria da pré-fabricação

Com o intuito de demonstrar as vantagens da utilização do BAC e identificar alterações a implementar no processo de fabrico transporte e colocação, com vista a alcançar maior benefícios técnicos e económicos, foram levados a cabo duas experiências em fábricas de pré-fabricação. Estes ensaios à escala real, realizados nas fábricas de Nelas e Rio Maior, permitiram retirar as seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos são encorajadores, e indicativos de que a produção de BAC é viável do ponto de vista técnico e económico. Demonstrou-se o potencial do BAC para um aumento da produtividade através da redução do tempo de construção e para uma diminuição dos custos globais, especialmente em BAC de classes de resistência mais elevadas;
- Dado que as propriedades do BAC são mais afectadas por variações da composição do que o betão convencional é fundamental controlar/monitorizar o teor de humidade (com especial relevo nos agregados finos) e minimizar as variações nos materiais finos (cimentos e adições) e agregados. Caso ocorram alterações devem-se realizar os correspondentes ajustes nas quantidades da composição;
- Os produtores de betão devem exigir dos fornecedores dos agregados maior uniformidade dos materiais no sentido de minimizar as variações na distribuição granulométrica e forma dos agregados;
- A experiência obtida no âmbito destes ensaios permitiu demonstrar a importância da robustez da mistura, ou seja, é necessário que a mistura seja insensível, tanto quanto possível, a pequenas variações dos materiais constituintes;
- Apesar de uma determinada composição de BAC ter sido otimizada com sucesso, em laboratório, é sempre necessário verificar se são alcançadas as propriedades adequadas para o BAC em condições reais de produção e, se necessário, ajustar a composição. De entre as causas possíveis para justificar as diferenças observadas entre a mistura no laboratório e na central foram identificadas as seguintes: a eficiência da mistura; variação da auto-compactabilidade com o tempo; desvios na pesagem dos materiais; desvios na determinação da humidade dos agregados; variações nas características dos materiais e das condições ambientais;

- Nas condições actuais das misturadoras utilizadas nos ensaios à escala real, para obter uma mistura adequada do BAC foi necessário prolongar o tempo de amassadura além do habitualmente usado. Enquanto que o betão convencional necessita em média de 30 a 40 segundos para ser misturado, nas composições de BAC o tempo médio de mistura foi cerca de 2 minutos;
- O sistema de transporte e colocação do betão deve ser repensado de forma a permitir um aumento da produtividade e uma maior qualidade das peças. A capacidade da misturadora e do sistema de transporte do betão devem ser dimensionados por forma a assegurar uma betonagem contínua das peças. Uma interrupção da betonagem promove o aparecimento de juntas frias que constituem pontos fracos quer a nível mecânico como de durabilidade;
- De forma a permitir um aumento de produtividade, o sistema de cofragem deve ser repensado tendo em vista a utilização do BAC;
- É fundamental formar os operários para lidarem com esta nova tecnologia, para evitar que se cometam erros por aplicar as práticas habituais do betão convencional.

6.1.3 Propriedades mecânicas e de durabilidade do BAC e do BC

O BAC produzido no âmbito do ensaio à escala real em Nelas foi caracterizado no estado fresco e endurecido, recorrendo aos mesmos ensaios utilizados durante o estudo laboratorial, o que permitiu observar as diferenças entre as misturas produzidas no laboratório e nas condições reais de produção. Em termos do betão fresco os ensaios realizados revelaram um betão ligeiramente mais viscoso do que o obtido em laboratório, decorrente da quantidade de água retirada para precaver um eventual erro na determinação das humidades. Contudo, as propriedades endurecidas do BAC, mecânicas e de durabilidade, das composições produzidas em laboratório e *in situ* revelaram-se semelhantes.

Em cada ensaio à escala real, paralelamente à produção do BAC foi produzido um betão convencional, procedendo-se a uma caracterização alargada de diversas propriedades do betão endurecido, sobre provetes moldados, o que permitiu fazer uma análise comparativa de ambos os betões. Analisando os resultados dos ensaios de avaliação das propriedades do betão endurecido verificou-se que o facto da tecnologia do BAC introduzir alterações nas proporções da mistura e no próprio processo de produção, repercutiu-se em

claras diferenças nas características mecânicas e de durabilidade do betão. Nos pontos que se seguem ressaltam-se os aspectos mais importantes desta comparação.

- Apesar do menor conteúdo em agregado grosso, o BAC exibiu resistências à compressão ligeiramente superiores às do betão convencional. O incremento verificado na resistência à compressão está fundamentalmente relacionado com a menor razão água/finos apresentada pelas composições de BAC. Contudo a utilização de maior volume de finos e a consequente alteração no esqueleto granular da mistura também têm influência nesta propriedade do betão endurecido;
- Dado o maior conteúdo em finos e a correspondente diminuição no volume de agregado grosso é plausível encontrar valores mais baixos do módulo de elasticidade no betão auto-compactável;
- O BAC apresentou em todos os ensaios uma resistência à tracção claramente superior à do betão convencional. A melhor microestrutura apresentada pelo BAC, fruto da utilização de maior quantidade de finos, permite uma transferência mais eficaz de forças entre a matriz cimentícia e os agregados;
- Apesar de escassos os resultados dos ensaios de retracção, estes permitem concluir que, para as composições estudadas, BAC e convencional apresentam deformações muito semelhantes. Se por um lado o elevado conteúdo em finos afecta de forma negativa a retracção do BAC por outro lado, o facto deste possuir uma microestrutura mais densa parece contribuir para menores deformações por retracção;
- Em princípio, salvo diferenças da razão água/cimento, a menor absorção de água por capilaridade observada nas composições de BAC poderá justificar-se pela presença de finos na sua composição e por uma boa dispersão das partículas de cimento e fíler proporcionada pelo superplastificante. Estes factores contribuem para que o BAC apresente uma estrutura mais compacta e homogénea e uma rede porosa mais fechada com poros capilares de menor diâmetro;
- Os ensaios de penetração de cloretos e carbonatação, e à semelhança do que indicaram os resultados da absorção de água por capilaridade, permitem concluir que a microestrutua da camada de recobrimento do BAC é mais densa. Os ensaios realizados revelaram um melhor comportamento do BAC ao ataque de agentes exteriores de degradação, potenciando por isso um betão com maior durabilidade.

Para os ensaios à escala real levados a cabo na indústria da pré-fabricação foram seleccionados elementos reais representativos dos elementos produzidos em cada uma das fábricas, nomeadamente, vigas-caixão, box-culverts e vigas I, de geometria complexa e zonas de elevada densidade de armadura. A par do fabrico das composições de BAC foi produzido betão convencional, utilizado também na betonagem do mesmo tipo de elementos. As principais conclusões relativamente à qualidade do enchimento, à qualidade da superfície e às propriedades do material nos elementos betonados com ambos os tipos de betão são apresentadas em seguida:

- Todos os elementos betonados com BAC foram completamente preenchidos, aparentemente sem vazios interiores e com as armaduras completamente envolvidas;
- À semelhança do que aconteceu nas peças betonadas com betão convencional, as superfícies inclinadas das peças de BAC apresentaram alguns poros superficiais originados por bolhas de ar;
- No que concerne à resistência à compressão e módulo de elasticidade, o BAC revelou-se um material mais homogéneo e isotrópico ao longo de toda a peça. O resultado da vibração é em geral um betão com compactação desigual (ninhos de brita, segregação) e consequentemente com diferentes propriedades mecânicas e de durabilidade. O BAC dotado das propriedades adequadas não necessita de vibração, o que reflecte o seu potencial para reduzir a variabilidade das características do betão ao longo da estrutura;
- De uma forma geral, as propriedades mecânicas e durabilidade do betão da box-culvert revelou piores características do que o betão dos provetes, permitindo concluir que as condições de cura do betão são fundamentais para o seu comportamento no estado endurecido. De salientar que estas diferenças foram observadas quer no BAC quer no betão convencional.

6.1.4 Aplicação do sistema CPF em peças betonadas com BAC e com betão convencional

No ensaio à escala real em Rio Maior, durante a betonagem de uma box-culvert de BAC e de betão convencional, foi empregue o sistema de cofragem de permeabilidade controlada (CPF) e o seu desempenho foi comparado com a cofragem usual. Nos pontos que se seguem apresentam-se as principais conclusões deste estudo:

- Todos os ensaios realizados confirmaram a melhoria dos parâmetros de durabilidade do betão de recobrimento pelo uso dos sistemas CPF, nomeadamente a absorção de água por capilaridade, a resistência à penetração de cloretos e a resistência à carbonatação;
- A utilização de dois sistemas CPF distintos revelou existirem diferenças quanto à sua eficiência na melhoria da qualidade do betão de recobrimento. O sistema CPF-B, sistema constituído por um filtro/dreno mais rígido e características diferentes do CPF-A, proporcionou um betão de recobrimento com melhores propriedades de durabilidade;
- Nos ensaios de absorção de água por capilaridade e resistência à penetração de cloretos observou-se uma maior eficácia do sistema CPF quando utilizado conjuntamente com a tecnologia do BAC.

6.2 PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho foi identificado um conjunto de aspectos relacionados com a temática abordada que seria de grande interesse investigar em trabalhos futuros.

Um aspecto que se torna emergente na tecnologia do BAC é estabelecer um método de dimensionamento de composições mais orientado que considere as propriedades específicas de cada material constituinte e que conduza a uma composição otimizada, capaz de satisfazer todo o tipo de requisitos de desempenho. Tendo em vista este objectivo, é fundamental dispor de modelos numéricos que relacionem as propriedades relevantes do betão fresco e endurecido com as características dos materiais. Numa primeira fase seria importante estabelecer um conjunto de expressões que permitissem relacionar os parâmetros medidos nos ensaios reológicos (viscosidade e tensão de cedência) com os resultados obtidos nos ensaios de trabalhabilidade. Os ensaios de trabalhabilidade e reológicos constituem preciosos auxílios para o ajuste dos modelos numéricos, contudo a sua definição deverá passar pela utilização de ferramentas estatísticas e métodos de elementos discretos que permitam simular o comportamento do betão no estado fresco.

Apesar das investigações que têm vindo a ser realizadas para avaliar o comportamento do BAC, ainda persistem algumas dúvidas quanto às suas propriedades no estado endurecido nomeadamente, no que respeita à retracção, fluência e parâmetros de durabilidade. Tratam-se de propriedades que dependem de inúmeros factores e cuja forma de estabelecer a comparação com o betão convencional ainda não reúne consenso. Um dos principais problemas destes estudos comparativos reside na escolha do parâmetro da

composição que serve para definir a composição de betão convencional de comparação, isto é, mesma resistência à compressão, igual razão água/cimento, igual razão água/finos, etc.

Os ensaios à escala real realizados em fábricas de pré-fabricação evidenciaram as inúmeras vantagens da aplicação da tecnologia do BAC, no entanto questões relacionadas com a forma de descarga do betão, qualidade das superfícies de acabamento, pressões em cofragens ou robustez das composições ainda necessitam de ser clarificadas. A robustez das composições de BAC continua a ser um aspecto pouco divulgado mas de grande importância quando se pretende garantir a qualidade na aplicação desta tecnologia. É necessário continuar a investir em métodos cada vez mais fiáveis que possibilitem a avaliação da robustez das misturas e que permitam seleccionar, de forma fundamentada, uma de duas (ou mais) composições alternativas para uma mesma aplicação.

Os resultados apresentados neste trabalho revelaram-se bastante animadores quanto à utilização conjunta da tecnologia do BAC e do sistema CPF. Propõem-se contudo que se realize uma investigação mais aprofundada no que respeita à avaliação da eficácia desta aplicação na melhoria da qualidade do betão de recobrimento e à definição de custos inerentes à sua utilização, de acordo com o tipo de obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFGC (2000), "Btons auto-plaçants: recommandations provisoires." Association Française de Génie Civil.
- Aïtcin, P. (1998), "High-Performance concrete." London and New York, E & FN SPON.
- Aïtcin, P., Jolicoeur, C., *et al.* (1994), "Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't.", *Concrete International*, vol. 16, (5), pp. 45-52.
- ASTM C 42/C 42M (1999), "Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete."
- ASTM C1202-97 (1997), "Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration."
- ASTM D 4643 (1993), "Standard Test Method for Determination of Water Content of Soil by the Microwave Oven Method."
- Audenaert, K., Boel, V., *et al.* (2005), "Chloride penetration in self-compacting concrete by non steady state migration test." 2nd North American Conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Chicago, United States of America.
- Azevedo, A. (2002), "Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes.", PhD, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Banfill, P. (2003), "The rheology of fresh cement and concrete - A review ", 11th International Cement Chemistry Congress, Durban.

- Bartos, P. (1992), "Fresh concrete: Properties and tests."
- Bartos, P. e Grauers, M. (1999), "Self-compacting concrete." *Concrete*, vol. 33, (nº4), pp. 9-13.
- Bayramov, F., Tasdemir, C., *et al.* (2003), "Optimization of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method.", *Cement and Concrete Composite*, vol. 29, pp. 665-675.
- Beaupré, D. e Mindess, S. (1998), "Rheology of fresh concrete: principles, measurement, and applications.", *Materials Science of Concrete*, pp. 149-190.
- Bernabeu (2000), "Final Report of Task 7: Form system and surface quality.", *Rational Production and Improved Working Environment through Using Self-Compacting Concrete*. Brite EuRam project BRPR-CT96-0366.
- Bibm, Cembureau, *et al.* (2005), "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - Specification, Production and Use."
- Billberg, P. e Österberg, T. (2001), "Thixotropy of self-compacting concrete.", 2^{sd} International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, 23-25 October, Tokyo, Japan.
- Bonen, D. e Shah, S. P. (2005), "Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete." *Concrete Construction*, vol. 7, pp. 14-26.
- Cánovas, M. e Gutiérrez, P. (1992), "Composición y dosificación de los hormigones de alta resistencia, El hormigón de altas resistências y suas aplicaciones." *Cemento-Hormigon*, vol. 709, pp. 971-990.
- Chen, Y., Tsai, C., *et al.* (2003), "The study on mixture proportion of gap-gradation of aggregate for SCC." 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland.
- Coutinho, A. e Gonçalves, A. (1994), "Fabrico e propriedades do betão.", Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, J. S. (1998), "Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem.", PhD, Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coutinho, J. S. (2001), "Effect of controlled permeability formwork (CPF) on white concrete.", *ACI Materials Journal*, pp. 148-158.

- Coutinho, J. S. (2005), "CPF – Cofragem de permeabilidade controlada - Um método para minimizar os efeitos da degradação do betão armado ou pré-esforçado.", Engenharia e vida, vol. 15.
- David, J. (1999), "Betão auto-compactável: um material novo para a pré-fabricação.", 3^{as} Jornadas de Estruturas de Betão, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Dhir, R. e McCarthy, M. (1999). "Controlling concrete degradation." Proceedings of the International Seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK.
- Dransfield, J. (2003), "Admixtures for concrete, mortar and grout - Advanced Concrete Technology. Constituent Materials."
- E 391 (1993), "Determinação da resistência à carbonatação."
- E 397 (1993), "Determinação do módulo de elasticidade em compressão."
- E 398 (1993), "Determinação da retracção e da expansão."
- E 399 (1993), "Determinação da fluência em compressão."
- E 463 (2004), "Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário."
- EFNARC (2002), "Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete."
- EN 206-1 (2000), "Concrete - Part1: Specification, performance, production and conformity."
- EN 1992-1-1 (2004), "Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios."
- Esping, O. (2003), "Methods for characterisation of fillers and fines for self-compacting concrete." 3rd International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland.
- Estevéz, J. e Gutiérrez, M. (1990), "Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos." Madrid, Centro de Estudios y Experimentación de obras públicas - Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.
- Fang, W., Jianxiong, C., *et al.* (1999), "Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives.", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-14 September, Stockholm, Sweden.

- Ferraris, C. (1999a), "Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report.", Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 104, (5), pp. 461-478.
- Ferraris, C. (1999b), "Measurement of the rheological properties of cement paste: A new approach.", Research of the National Institute of Standards and Technology.
- Ferraris, C. (1999c), "Measurement of rheological properties of high performance concrete: State of the Art Report.", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 104, (5), pp. 461-478.
- Ferraris, C. (2001), "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete.", Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 245-255.
- Ferraris, C. e Gaidis, J. (1992), "Connection between the rheology of concrete and the rheology of cement paste." ACI Journal, vol. 88, pp. 388-393.
- Gettu, R. e Agulló, L. (2003), "Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización."
- Golaszewski, J. e Szwabowski, J. (2004), "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars.", Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 235-248.
- Gomes, P. (2002), "Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.", PhD, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports Universitat Politècnica de Catalunya.
- Guimarães, R. e Cabral, J. (1998), "Estatística."
- Hartmann, C. T. e Helene, P. (2001), "Influência do uso de aditivos superplastificantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos ", 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 18-23 de Agosto, Foz do Iguaçu.
- JSCE (1998), "Recommendation for Construction of Self-Compacting Concrete", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan.
- Juvas, K. (2005), "Experiences with SCC in the production of prefabricated elements.", 2nd North American Conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Chicago, United States of America.

- Juvas, K., Käppi, A., *et al.* (2002), "The effects of Cement Variations on Concrete Workability." Summer course on Rheology of Fresh Cementitious Materials – Self-Compacting Concrete (Study materials), Technical University of Denmark.
- Kashima, S., Kanazawa, K., *et al.* (1998), "Application of self compacting concrete made with low-heat cement for bridge substructures of Honshu-shikoku bridge authority.", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan.
- Khayat, K. (1996), "Effect of antiwashout admixtures on properties of hardened concrete.", *ACI Mater*, vol. 93, (2), pp. 134-146.
- Khayat, K., Ghezal, A., *et al.* (2000), "Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete.", *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 338-344.
- Khayat, K., Hu, C., *et al.* (1999), "Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications." 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-14 September, Stockholm, Sweden.
- Kitamura, H., Nishizaki, T., *et al.* (1998), "Construction of prestressed concrete outer tank for LNG storage using high-strength self-compacting concrete.", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan.
- Klug, Y. e Holschemacher, K. (2003), "Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete.", 3rd International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.
- Larrard, F., Ferraris, C., *et al.* (1998), "Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material.", *Materials and Structures*, vol. 31, (8/9), pp. 494-498.
- Larrard, F. e Roy, R. (1992), "Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances." *Materials and Structures*, vol. 89, (5), pp. 517-520.
- Larrard, F. D., Bosc, F., *et al.* (1997), "The AFREM method for the mix-design of High performance concrete.", *Materials and Structures*, vol. 30, pp. 439-446.
- Maekawa, K., Chaube, R., *et al.* (1999), "Modelling of concrete performance ".
- Mansur, M. A., Asce, M., *et al.* (2002), "Interpretation of Concrete Strength for Monstandart Specimens." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 151-155.
- Maroco, J. (2003), "Análise Estatística com Utilização do SPSS ", Lisboa.

- Martys, N. e Ferraris, C. (2002), "Simulation of SCC flow", 1st North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, Rosemont, Illinois.
- Montgomery, D. (1996), "Design and analysis of experiments." New York.
- Montgomery, D. e Runger, G. (1999), "Applied statistics and probability for engineers.", New York.
- Nawa, T., Izumi, T., *et al.* (1998), "State-of-art report on materials and design of self-compacting concrete ", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan.
- Neville, A. M. (2002), "Properties of Concrete."
- Níelsson, I. e Wallevik, O. (2003), "Mix design of HS-SCC and practical application.", 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.
- Noguchi, T. e Mori, H. (1998), "State-of-the-art report: evaluation of fresh properties of self-compacting concrete in laboratory and on site.", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan.
- NP EN 197-1 (2001), "Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes."
- NP EN 206-1 (2005), "Betão Parte1: Especificação, desempenho, produção e conformidade."
- NP EN 450-1 (2006), "Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade."
- NP EN 445 (2000), "Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio."
- NP EN 12350-2 (2002), "Ensaio do betão fresco – Parte2: Ensaio de abaixamento."
- NP EN 12390-3 (2003), "Ensaio do betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio."
- NP EN 12390-4 (2003), "Ensaio do betão endurecido – Parte 4: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio."
- NP EN 12390-5 (2003), "Ensaio do betão endurecido – Parte 5: Resistência à flexão de provetes."

- NP-EN 12390-6 (2003), "Ensaio do betão endurecido – Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes."
- NP EN 12390-8 (2003), "Ensaio do betão endurecido – Parte 8: Profundidade de penetração de água sob pressão."
- NP EN 12504-1 (2003), "Ensaio do betão nas estruturas – Parte1: Carotes. Extracção, exame e ensaio à compressão."
- NT BUILD 492 (1999), "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments."
- Nunes, S. (2001), "Betão auto-compactável. Tecnologias e propriedades." Grau de Mestre, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Nunes, S., Figueiras, H., *et al.* (2004), "Método para a definição da composição do BAC." Encontro Nacional de Betão Estrutural 2004, 17 a 19 de Novembro, FEUP-Porto.
- Nunes, S., Figueiras, H., *et al.* (2005), "Método para definição da composição de betão auto-compactável. Self-compacting concrete mix-design method.", e-Mat- Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de construção, vol. 2, pp 1-11.
- Nunes, S., Figueiras, H., *et al.* (2006a), "A methodology to assess the robustness of SCC mixtures.", Cement and Concrete Research, (revision).
- Nunes, S., Figueiras, H., *et al.* (2006b), "A measure of performance of self-compacting concrete mixtures.", Compstat - 17th Conference of IASC-ERS, 28 Aug - 1 Spt, Rome, Italy.
- Nunes, S., Leite, A., *et al.* (2002). "Tecnologia de fabrico e aplicação do BAC.", Encontro Nacional do Betão Estrutural 2002, Lisboa, LNEC.
- Okamura, H. (1997), "Ferguson Lecture for 1996: Self-compacting high-performance concrete.", Concrete International, vol. 19, (7), pp. 50-54.
- Okamura, H. e Ouchi, M. (1999), "Self-compacting concrete. Development, present use and future.", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-14 September, Stockholm, Sweden.
- Okamura, H. e Ouchi, M. (2003) "Self-compacting concrete." Advanced Concrete Technology, vol. 1, (1), pp. 5-15.
- Okamura, H., Ozawa, K., *et al.* (2000), "Self-compacting concrete.", Structural Concrete Journal of fib, vol. 1, (1), pp. 3-17.

- Ouchi, M. (1998), "History of development and applications of self-compacting concrete in Japan.", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan.
- Ozawa, K., Maekawa, K., *et al.* (1992), "Development of high performance concrete.", Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, vol. 41, (3), pp. 381-439.
- Pestana, M. H. e Gageiro, J. N. (2005), "Descobrimos a regressão com a complementaridade do SPSS."
- Petersson, O. (1999), "Final Report of Task 2: Workability.", Rational Production and Improved Working Environment through Using Self-Compacting Concrete. Brite EuRam project BRPR-CT96-0366.
- Petersson, O., Billberg, P., *et al.* (1995), "Effects of the second generation of superplasticizers on concrete properties."
- Petersson, O., Billberg, P., *et al.* (1996). "A Model for Self-Compacting Concrete.", International Rilem Conference - Production Methods and Workability of Concrete.
- Pineaud, A., Cabrillac, R., *et al.* (2005), "Mechanical properties of self-compacting concrete - Influence of composition parameters ", 2nd North American Conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete and 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Chicago, United States of America.
- Ramachandran, S. (1995), "Concrete Admixtures Handbook.", Noyes Publications.
- Roncero, J. (2000), "Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes.", PhD, Escola Técnica Superior D' Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya.
- S. Jiang, B. K., P. Aitcin (1999), "Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility." Cement and Concrete Research, vol. 29, pp. 71-78.
- Saak, A. (2000), "Characterization and modeling of the rheology of cement paste: with applications toward self-flowing materials.", PhD, Northwestern University.
- Saak, W., Jennings, H., *et al.* (1999), "Characterization of the rheological properties of cement paste for use in self-compacting concrete.", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-14 September, Stockholm, Sweden.

- Sampaio, J. (2000), "Uma nova tecnologia de betões com aplicação na pré-fabricação.", 1º Congresso Nacional da Indústria de Pré-Fabricação em Betão.
- Santos, R., Lopes, J., *et al.* (2004a), "Relatório de Actividade III - Desenvolvimento de uma Tecnologia Robusta para o Fabrico, Transporte e Aplicação do Betão Auto-Compactável.", Consórcio BACPOR.
- Santos, R., Lopes, J., *et al.* (2004b), "Efeito de diferentes superplastificantes na reologia da pastas de cimento para BAC.", Encontro Nacional de Betão Estrutural 2004, 17 a 19 de Novembro, FEUP-Porto.
- Santos, R., Lopes, J., *et al.* ((a submeter)), "Cement pastes rheometry and rheological nature.", Cement and Concrete Research.
- Schutter, G. D., Audenaert, K., *et al.* (2003), "Transport properties in self-compacting concrete and relation with durability: overview of a belgian research project." 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.
- Sedran, T. (2000), "Final Report of Task 5: Mix-design methods.", Rational Production and Improved Working Environment through Using Self-Compacting Concrete. Brite EuRam project BRPR-CT96-0366.
- Sedran, T. e Larrard, F. (1999), "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model.", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-14 September, Stockholm, Sweden.
- Skarendahl, A. (1998), "Self-compacting concrete in Sweden. Research and application.", International Workshop on Self-Compacting Concrete, 23-26 August, Japan,
- Skarendahl, A. (2003), "The present - The future ", 3rd International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland,
- Skarendahl, A. e Petersson, O. (2001), "Self-Compacting Concrete - State-of-Art report of RILEM Committee 174-SCC." RILEM Publications.
- Soares, R. (2005), "Curso sobre Princípios de Reologia da Bohlin Instruments."
- Sonebi, M. (2001), "Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts.", Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 1553-1560.

- Sonebi, M. (2004), "Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans.", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1199-1208.
- Sonebi, M., Bartos, P., *et al.* (2000), "Final Report of Task 4: Properties of Hardened Concrete.", *Rational Production and Improved Working Environment through Using Self-Compacting Concrete*. Brite EuRam project BRPR-CT96-0366
- Street, L., Watters, G., *et al.* (1996), "Elementary fluid mechanics.", New York, John Wiley & Sons.
- Takada, K., Pelova, G., *et al.* (1998), "Self-compacting concrete produced by Japanese Method with Dutch materials." 12th European Ready Mixed Concrete Congress, Lisboa.
- Takada, K., Pelova, G., *et al.* (1999), "Influence of microfillers on proportioning of mortar in self-compacting concrete.", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 13-14 September, Stockholm, Sweden.
- Tangtermsirikul, S. (1998), "Design and construction of self-compacting concrete in Thailand.", *International Workshop on Self-Compacting Concrete*, 23-26 August, Japan.
- RILEM TC116-PCD (1999), "Permeability of concrete as a criterion of its durability: Determination of the absorption of water of hardened concrete."
- Toussaint, F., Juge, C., *et al.* (2001), "Assessment of thixotropic behavior of self-compacting microconcrete.", 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 23-25 October, Tokyo, Japan.
- Uno, Y. (1998), "State-of-the-art-report on the concrete products made of self-compacting concrete.", *International Workshop on Self-compacting Concrete*, 23-26 August, Japan.
- Uomoto, T. e Ozawa, K. (1998), "Recommendation for self-compacting concrete." *JCSE Concrete Engineering Series*,
- Vaughn, N., Polnaszek, C., *et al.* (2000), "Design -Expert Software."
- Wallevik, J. (2003a), "Rheology of particle suspensions. Fresh concrete, mortar and cement pastes with various types of lignosulfonates.", PhD, Norwegian University of Science and Technology.
- Wallevik, O. (2003b), "Rheology of cement suspensions.", IBRI- Rheology Course.

- Walraven, J. (2003), "Structural aspects of self-compacting concrete.", 3rd International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.
- Yahia, A. e Khayat, K. (2001), "Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout.", Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 749-757.
- Zhu, W. e Bartos, P. (2003), "Permeation properties of self-compacting concrete." Cement and Concrete Research, vol. 33, pp. 921-926.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS FINOS

A.1.1 Cimentos

No decorrer dos estudos realizados ao longo deste trabalho utilizado cimento *Portland* da fábrica da *CIMPOR de Alhandra e Souselas*, do Tipo II/A-L 42.5R e do Tipo I 42.5R e 52.5R (segundo a NP EN 197-1 (2001)). As respectivas curvas granulométrica são apresentadas na Figura A.1. No Quadro A.1 apresenta-se os valores da composição química, propriedades físicas e propriedades mecânicas, obtidos a partir do controlo estatístico realizado pelos laboratórios da empresa.

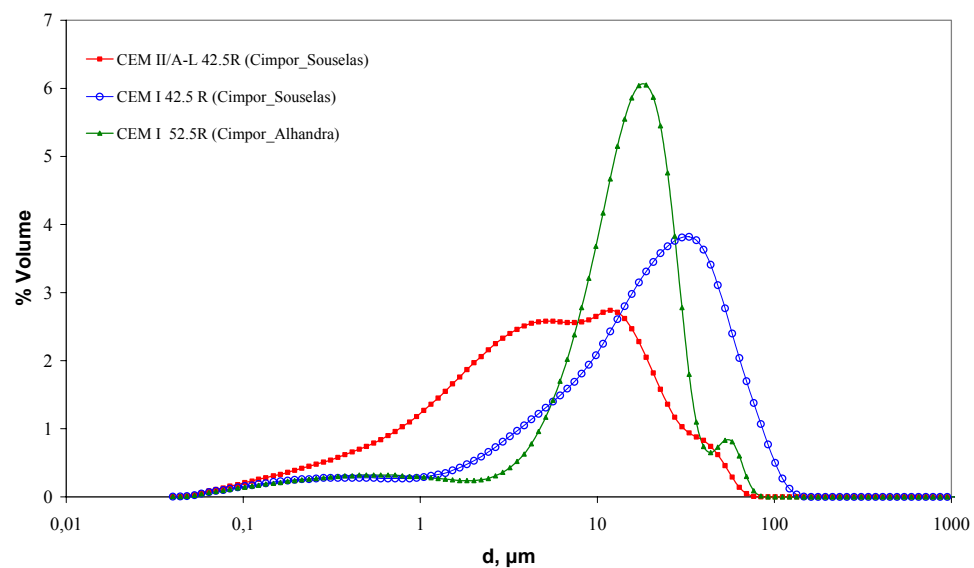


Figura A.1 – Distribuição granulométrica, em volume, dos materiais cimentos utilizados

Quadro A.1 – Caracterização química, física e mecânica do CEM II/A-L 42.5R, CEM I 42.5R e CEM I 52.5R

	CEM II/A-L 42.5R (Souselas)	CEM I 42.5R (Souselas)	CEM I 52.5 R (Alhandra)
Características Químicas	SiO ₂	18.56%	19.64 %
	Al ₂ O ₃	4.87%	5.56 %
	Fe ₂ O ₃	2.91%	3.35 %
	CaO total	60.63%	63.23 %
	MgO	2.30%	1.66 %
	SiO ₃	3.33%	3.23 %
	Perda ao fogo	5.86%	1.92 %
	Cloretos	0.01%	0.02 %
	Cal livre	1.42%	2.34 %
	Resíduo insolúvel	2.51%	1.38 %
Características Físicas	Massa volúmica	3120 kg/m ³	3120 kg/m ³
	Superfície específica	4236 cm ² /g	4443 cm ² /g
	Resíduo 45 µm	10.7%	2.7 %
	Tempo início de presa	175 minutos	135 minutos
	Tempo fim de presa	225 minutos	182 minutos
	Expansibilidade	1.2%	1.8 %
Características Mecânicas	Resist. compressão 2 dias	31.9 MPa	39.7 MPa
	Resist. compressão 7 dias	44.4 MPa	52.1 MPa
	Resist. compressão 28 dias	52.6 MPa	62.1 MPa

A.1.2 Adições

A necessidade de uma maior quantidade de finos numa composição de BAC é muitas vezes conseguida à custa de cimento e adições. Nas composições estudadas foi utilizado como adição o filer calcário, dado a grande oferta deste material no mercado português. O filer calcário (Micro 100), cuja caracterização física e química se apresenta no Quadro A.2, foi fornecido pela empresa *Comital* (Companhia Mineira de Talcos, Lda). Na Figura A.2 é apresentada a respectiva curva granulométrica.

Quadro A.2 – Caracterização química do fíler calcário

Micro 100AB		
Características Químicas	CaCO ₃	99.0 %
	Al ₂ O ₃	<0.4 %
	Fe ₂ O ₃	0.04 %
	Insolúveis em HCl	0.36 %
	Massa volúmica	2700 kg/m ³
Características Físicas	Superfície específica	5150 cm ² /g
	Perda ao fogo	43.10 %
	Partículas < 106 µm	99.9 %
	Partículas < 36 µm	--
	Partículas <25 µm	82.0 %
	Partículas <10 µm	62.0 %
	Partículas <2 µm	--
Diâmetro médio		4.52 µm

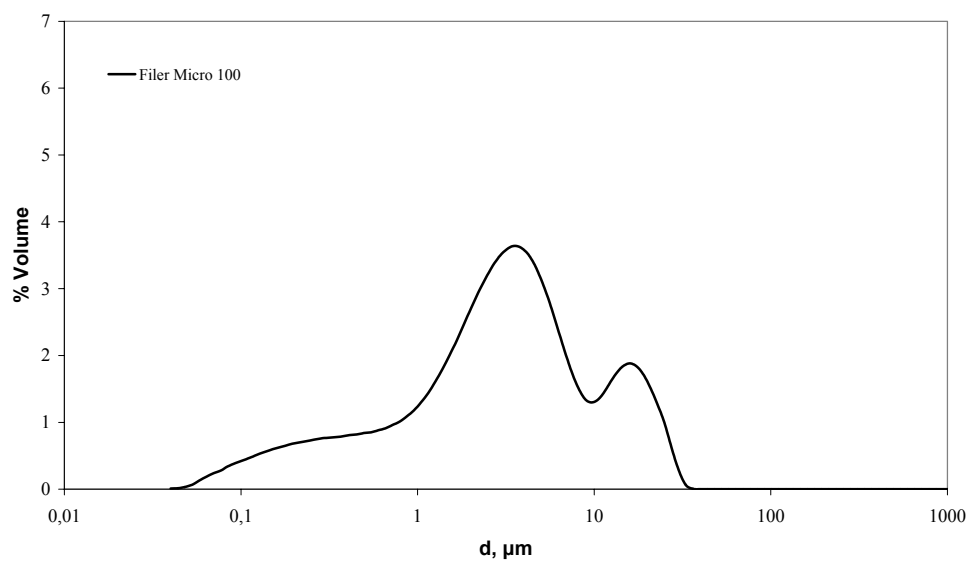


Figura A.2 – Distribuição granulométrica, em volume, do fíler calcário utilizado

A.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A.2.1 Agregados da composição MAPREL-Nelas

Na composição da Maprel-Nelas utilizou-se um conjunto de agregados constituído por duas areias, uma areia fina natural originária de S. Jacinto (Areia 1) e uma areia média artificial resultante da britagem de granito (Areia 2) e por uma brita de origem granítica, com dimensão máxima de 19mm (Brita 1) (Figura A.3).

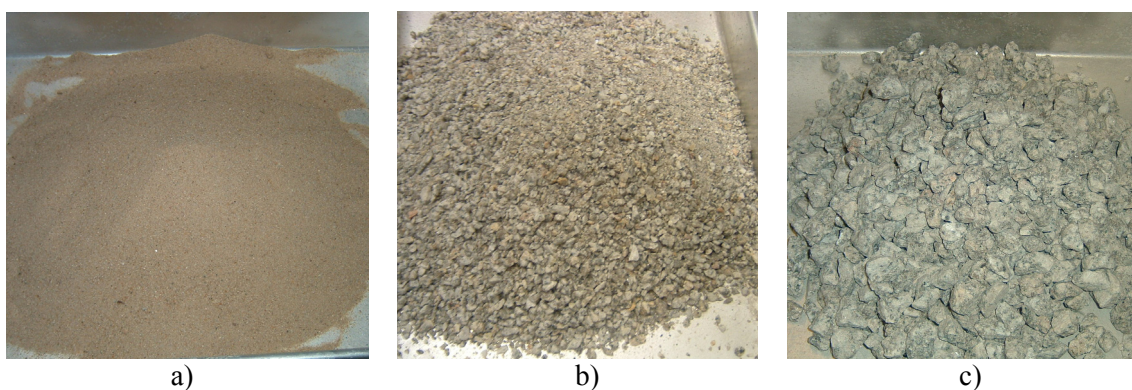


Figura A.3 – Amostras dos agregados da composição MAPREL-Nelas: a) areia fina natural; b) areia britada; c) brita granítica

Quadro A.3 – Caracterização do conjunto de agregados da MAPREL-Nelas
(baseado nos peneiros ASTM)

Designação	Agregados finos		Agregado grosso
	Areia 1	Areia 2	Brita 1
Dimensão máxima (mm)	0.59	4.76	19.00
% partículas com $d > 4,76\text{mm}$	0.00	9.98	95.58
% partículas com $0,074\text{mm} < d < 4,76\text{mm}$	99.82	88.84	3.69
% partículas com $d < 0,074\text{mm}$	0.18	1.18	0.73
Módulo de finura	1.77	3.85	6.43
Massa volúmica (kg/m^3)	2607	2477	2563
Baridade não compactada (kg/m^3)	1572	1483	1415
Baridade compactada (kg/m^3)	1678	1579	1498
Absorção de água (%)	0.40	1.42	1.18

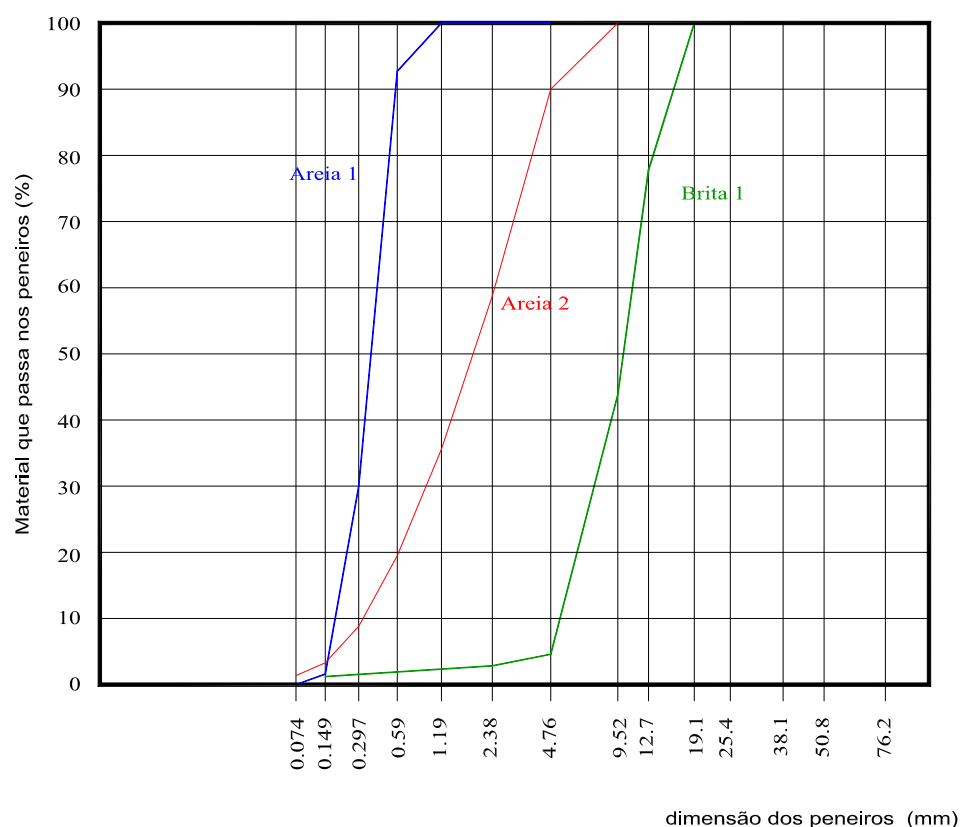


Figura A.4 – Curvas granulométricas do conjunto de agregados da MAPREL-Nelas

A.2.2 Agregados da composição MAPREL-Rio Maior

No estudo da composição MAPREL Rio-Maior foi utilizado uma areia fina natural, uma areia grossa natural e uma brita calcária com dimensão máxima de 12.5mm, como se pode observar na Figura A.5. No Quadro A.4 e na Figura A.6 apresentam-se as características dos agregados utilizados na composição MAPREL-Rio Maior.

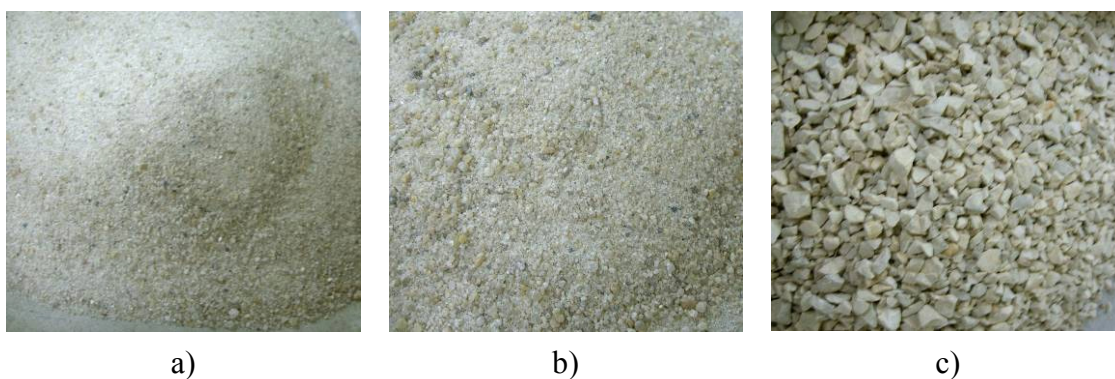


Figura A.5 – Amostras dos agregados da composição MAPREL-Rio Maior: a) areia fina natural; b) areia grossa natural; c) brita calcária

Quadro A.4 – Caracterização do conjunto de agregados da MAPREL-Rio Maior
(baseado nos peneiros ASTM)

Designação	Agregados finos		Agregado grosso
	Areia 1	Areia 2	Brita 1
Dimensão máxima (mm)	2.38	4.76	9.50
% partículas com $d > 4,76\text{mm}$	0.00	0.10	79.29
% partículas com $0,074\text{mm} < d < 4,76\text{mm}$	99.99	98.98	20.68
% partículas com $d < 0,074\text{mm}$	0.01	0.92	0.03
Módulo de finura	2.47	2.87	5.84
Massa volúmica (kg/m^3)	2544	2542	2605
Baridade não compactada (kg/m^3)	1460	1536	1401
Baridade compactada (kg/m^3)	1559	1641	1485
Absorção de água (%)	1.10	0.96	1.31

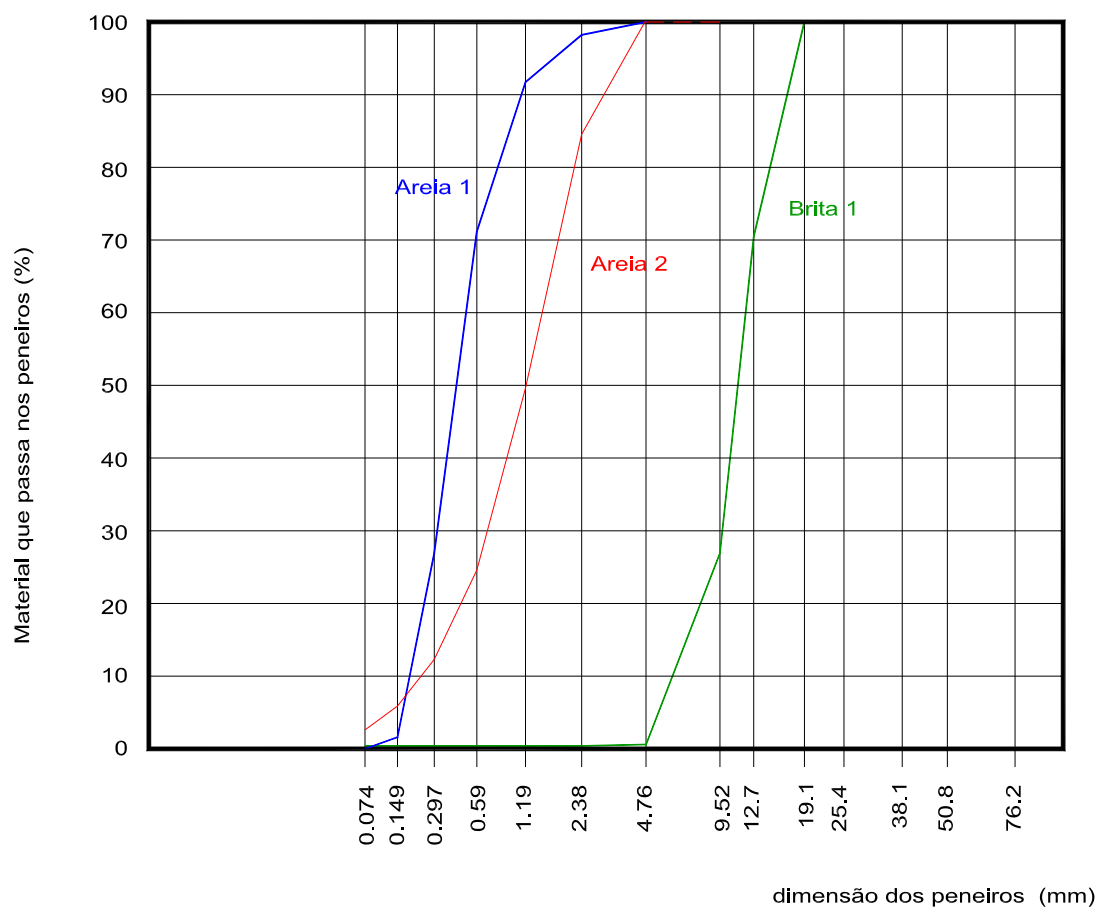


Figura A.6 – Curvas granulométricas do conjunto de agregados da MAPREL-Rio Maior

A.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ADJUVANTES

Nas composições estudadas no âmbito deste trabalho foram utilizados dois adjuvantes de uma das marcas presentes no mercado português, Sika. O superplastificante V3000 é recomendado pelo fornecedor para a indústria de betão pronto, betão de elevada resistência e com tempos de transporte elevados, o V3001 para o caso de se utilizar areias britadas e o V3002 é recomendado para a indústria da pré-fabricação, com elevadas resistências iniciais e descofragem rápida. As principais propriedades destes superplastificantes apresentam-se no Quadro A.5, conforme a especificação fornecida pelo fabricante.

Quadro A.5 – Propriedades dos superplastificantes V3000 e V3002

Designação	V3000	V3001	V3002
Base	Carboxilatos modificados	Policarboxilatos modificados, agentes de coesão e de redução do atrito	policarboxilatos modificados
Aspecto	líquido levemente	líquido castanho claro	líquido castanho claro
Peso específico	$1.05 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$	$1.01 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$	$1.06 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
Teor de sólidos	$18.5 \pm 1.5\%$	$18.0 \pm 0.9\%$	$26.5 \pm 1.2\%$
pH	5.0 ± 1.0	4.5 ± 1.0	4.3 ± 1.0
Dosagem	1.0 – 2.0% (*)	1.0 – 2.0% (*)	1.0 – 2.0% (*)

(*) dosagem relativa à massa de cimento

ANEXO B

SEQUÊNCIA DE AMASSADURAS

B.1 SEQUÊNCIA DE AMASSADURA PARA AS PASTAS

A amassadura das pastas foi realizada na misturadora apresentada na Figura B.1 e de acordo com a seguinte sequência:

1. Misturar os finos (cimento + adição) com uma quantidade de água inicial (água 1, correspondente a 80% da água total), durante 60 segundos, a velocidade lenta;
2. Parar a misturadora por um período de 30 segundos, durante o qual descola-se o material aderente nas paredes da panela com a ajuda de uma espátula;
3. Misturar durante 60 segundos, a velocidade lenta;
4. Parar a misturadora por um período de 30 segundos, repetir a operação de limpeza das paredes e pá, e adicionar a água restante (água 2 = água total - água 1) com o superplastificante;
5. Misturar a velocidade rápida durante 120 segundos.

A pá da misturadora tem um movimento de rotação sobre si mesma acompanhado de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente e duas velocidades: lenta (140min^{-1} de rotação e 62min^{-1} de movimento planetário) e rápida (285min^{-1} de rotação e 125min^{-1} de movimento planetário).



Figura B.1 – Misturadora utilizada para a amassadura das pastas e argamassas

B.2 SEQUÊNCIA DE AMASSADURA PARA AS ARGAMASSAS

A amassadura das argamassas foi realizada na misturadora apresentada na Figura B.1 e de acordo com a seguinte sequência:

1. A baixa velocidade, misturam-se os agregados finos, os finos (cimento + adição) e parte da água total (água 1) durante 1 minuto;
2. Descolam-se os materiais aderentes às paredes e pá com a ajuda de uma colher durante 30 segundos e reinicia-se a mistura por mais 1 minuto a velocidade lenta;
3. Adiciona-se a água restante (água 2 = água total - água 1) onde previamente se juntou o superplastificante, e mistura-se durante 1 minuto a velocidade lenta;
4. Repete-se a operação de limpeza das paredes e pá durante 30 segundos e mistura-se durante 30 segundos a baixa velocidade;
5. Pára-se o movimento durante 1 minuto;
6. Finalmente, mistura-se novamente durante 30 segundos a alta velocidade.

Para valor da água 1 adoptou-se a massa correspondente a $70\%\beta_p$, ou seja, é quantificada em função da maior ou menor exigência de água por parte da composição de materiais finos adoptada.

B.3 SEQUÊNCIA DE AMASSADURA PARA OS BETÕES

As amassaduras de betão foram realizadas numa betoneira de eixo vertical (Figura B.2) e seguindo a sequência de procedimentos que a seguir se apresenta:

1. Misturam-se os agregados grossos, agregados finos e $\frac{1}{4}$ da água total (quantidade de água que corresponde sensivelmente à água de absorção dos agregados) durante 2.5 minutos;
2. Pára-se o movimento durante 2.5 minutos para que se dê a absorção por parte dos agregados;
3. Adicionam-se os finos (cimento + adição) e a restante água ($\frac{3}{4}$ da água total) onde previamente se juntou o superplastificante, e mistura-se durante 5 minutos;
4. Descolam-se os materiais aderentes às paredes e pá com a ajuda de uma colher durante 30 segundos e reinicia-se a mistura por mais 3 minutos.



Figura B.2 – Betoneira de eixo vertical

ANEXO C

FORMULAÇÃO DA PASTA, ARGAMASSA E BETÃO

C.1 FORMULAÇÃO DA PASTA

As quantidades dos materiais constituintes da pasta, cimento, adição e água, podem ser definidas da seguinte forma (equações (C.1) a (C.5)):

$$V_p + V_w = 1.0 \text{ m}^3 \quad (\text{C.1})$$

$$V_p + \left(\frac{V_w}{V_p} \right) \times V_p = 1.0 \Rightarrow V_p = \frac{1}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (\text{C.2})$$

$$V_p = \frac{w_c}{\rho_c} + \frac{w_f}{\rho_f} = \left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{(f/c)}{\rho_f} \right) \times w_c \Rightarrow w_c = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{(f/c)}{\rho_f}} \quad (\text{C.3})$$

$$w_f = (f/c) \times w_c \quad (\text{C.4})$$

$$w_w = \frac{V_w}{V_p} \times V_p \times \rho_w \quad (\text{C.5})$$

No caso de pastas com superplastificante a quantidade de superplastificante líquido é definida à custa da massa total de finos (Equação (C.6)):

$$w_{sp} = (Sp/p) \times (w_c + w_f) \quad (C.6)$$

A correspondente massa de superplastificante sólido pode ser determinada com a informação do teor de sólidos (γ_{Sp}) (Equação (C.7)):

$$w_{sp\text{ sólido}} = w_{Sp} \times \gamma_{Sp} \quad (C.7)$$

Em pastas com superplastificante a quantidade de água a adicionar deve ser descontada a água presente no superplastificante, (w_{wc}), determinada através da Equação (C.8):

$$w_{wc} = w_w - w_{Sp} \times (1 - \gamma_{Sp}) \quad (C.8)$$

C.2 FORMULAÇÃO DA ARGAMASSA

As equações de formulação da argamassa assentam nos pressupostos de que as areias são previamente secas e que lhes são retiradas as partículas de dimensão superior a 4.75mm, consideradas como fazendo parte do agregado grosso.

As quantidades dos materiais constituintes da argamassa podem assim ser definidas da seguinte forma (Equação C.9):

$$V_s + V_p + \left(\frac{V_w}{V_p} \right) \times V_p = 1.0 \text{ m}^3 \Rightarrow V_p = \frac{1 - V_s}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (C.9)$$

Conhecendo o volume de finos (V_p), as massas de cimento (w_c), filer (w_f) e água (w_w) a adicionar podem ser calculadas através das equações (C.12), (C.13) e (C.14), respectivamente.

$$w_f/w_c = \left[\frac{w/c}{1000 \times \frac{V_w}{V_p}} - \frac{1}{\rho_c} \right] \times \rho_f \quad (C.11)$$

$$w_c = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{(w_f/w_c)}{\rho_f}} \quad (C.12)$$

$$w_f = (w_f/w_c) \times w_c \quad (C.13)$$

$$w_w = \frac{V_w}{V_p} \times V_p \times 1000 \quad (C.14)$$

Supondo a existência de duas areias a massa de cada uma delas pode ser determinada com as equações (C.15) e (C.16):

$$w_{s_1} = (s_1 / s) \times w_s \quad (C.15)$$

$$w_{s_2} = (1 - s_1 / s) \times w_s \quad (C.16)$$

A quantidade de superplastificante líquido é definida à custa da massa total de finos (Equação (C.17)):

$$W_{sp} = (Sp/p) \times (w_c + w_f) \quad (C.17)$$

A correspondente massa de superplastificante sólido pode ser determinada com a informação do teor de sólidos (γ_{sp}) (Equação (C.18)):

$$w_{sp} = W_{sp} \times \gamma_{sp} \quad (C.18)$$

A quantidade de água a adicionar (w_{wc}), descontando a água presente no superplastificante e acrescentando a água de absorção das areias é determinada através da Equação (C.19):

$$w_{wc} = w_w - W_{Sp} \times (1 - \gamma_{Sp}) + \sum_i w_{sdi} \times A_{si} \quad (C.19)$$

C.3 FORMULAÇÃO DO BETÃO

Partindo da equação fundamental que traduz a composição de um betão, Equação (C.20):

$$V_s + V_g + V_p + V_a + V_w = 1.0 \text{ m}^3 \quad (C.20)$$

Depois de definir os valores adequados para (V_w/V_p) , (Sp/p) , (V_s/V_m) , (s_1/s) e (w/c) através dos ensaios com a argamassa e fixando o volume de ar por m^3 de betão, para cada valor de V_{ap} é possível calcular as quantidades dos materiais constituintes do betão do seguinte modo (equações (C.21) e (C.22)):

$$V_g = V_{ap} \times V_{g,\text{lim}} (1 - V_a) \quad (C.21)$$

$$V_s = \frac{V_s}{V_m} \times (1 - V_a - V_g) \quad (C.22)$$

Conhecido o volume de agregados é possível determinar as restantes quantidades, substituindo na Equação (C.20) (Equação (C.23)):

$$V_s + V_g + V_p + V_a + \frac{V_w}{V_p} \times V_p = 1.0 \Rightarrow V_p = \frac{1 - V_s - V_g - V_a}{1 + \frac{V_w}{V_p}} \quad (C.23)$$

Conhecendo o volume de finos (V_p), as massas de cimento (w_c), filer (w_f) e água (w_w) a adicionar podem ser calculadas através das equações (C.12), (C.13) e (C.14), respectivamente. Supondo a existência de duas areias e uma brita, a massa de cada um dos agregados secos obtém-se usando as equações (C.24) a (C.27):

$$w_{gd} = V_g \times \rho_g \quad (C.24)$$

$$w_{sd} = \frac{V_s}{\frac{s1/s}{\rho_{sd1}} + \frac{(1-s1/s)}{\rho_{sd2}}} \quad (C.25)$$

$$w_{sd1} = (s1/s) \times w_s \quad (C.26)$$

$$w_{sd2} = (1-s1/s) \times w_s \quad (C.27)$$

A quantidade de água a adicionar por m^3 , descontando a água presente no superplastificante e adicionando a água de absorção dos agregados (assumindo que estes se encontram secos) ou descontando a água já presente nos agregados caso estes estejam molhados, é dada pela Equação (C.28).

$$w_{wc} = w_w - w_{Sp} \times (1 - \gamma_{Sp}) + \sum_i w_{sdi} \times (A_{si} - H_{si}) + w_{gd} \times (A_g - H_g) \quad (C.28)$$

Quando os agregados se encontram molhados, o seu peso deve ser corrigido da seguinte forma (equações (C.29) e (C.30)):

$$w_{sdc} = w_{sdi} \times (1 + H_{si}) \quad (C.29)$$

$$w_{gdc} = w_{gd} \times (1 + H_g) \quad (C.30)$$

ANEXO D

EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

D.1 ENSAIOS DE ESPALHAMENTO

D.1.1 Ensaio de espalhamento da pasta e argamassa

O procedimento adoptado para o ensaio de espalhamento com as pastas e argamassas foi o seguinte:

1. Humedecer o interior do cone e a superfície de uma placa metálica, passando com um pano húmido; colocar a placa sobre uma superfície firme, plana e nivelada;
2. Após o final da amassadura, encher o cone com uma amostra da pasta ou argamassa, nivelar no topo do cone e, em seguida, levantar de forma cuidadosa e contínua o cone na direcção vertical;
3. No final do movimento, medir o diâmetro aparentemente máximo da área de espalhamento e o diâmetro perpendicular a este (Figura D.1).

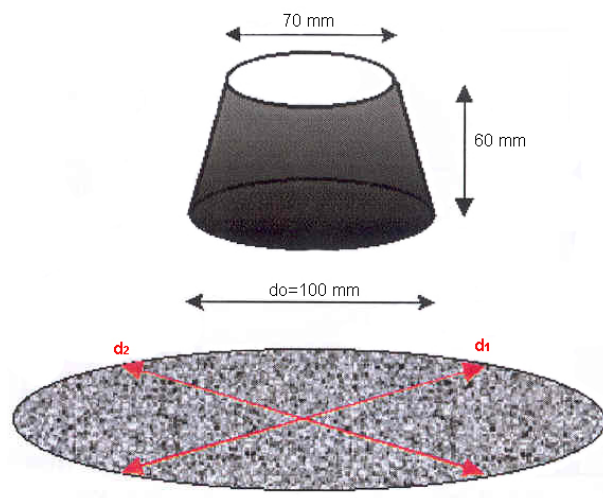


Figura D.1 – Equipamento para o ensaio de espalhamento da pasta e argamassa.

D.1.2 Ensaio de espalhamento do betão

Trata-se de um ensaio que permite avaliar a deformabilidade do BAC fresco a partir da observação da velocidade de deformação e diâmetro de espalhamento de uma amostra deformada por acção do peso próprio e da resistência oferecida pelas paredes do cone de *Abrams* (NP-EN-12350-2, 2002), *Skarendahl et al.* (2001). Para realizar este ensaio é necessário dispor de um cone de *Abrams*; uma placa de aço com uma espessura superior a 2mm, uma área superior a $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$, com uma superfície suave e com uma circunferência de 500mm nela desenhada; uma fita métrica e um cronómetro.

O procedimento adoptado para o ensaio de espalhamento com o betão foi o seguinte:

1. Humedecer o interior do cone e a superfície da placa de espalhamento, passando com um pano húmido; colocar a placa sobre uma superfície firme, plana e nivelada; e posicionar o cone no centro da mesma;
2. Após o final da amassadura, encher o cone de uma só vez, sem qualquer tipo de compactação, nivelar o betão no topo do cone e, em seguida, levantar de forma cuidadosa e contínua o cone na direcção vertical;
3. Após cessar o movimento do betão, medir o diâmetro aparentemente máximo da área de espalhamento do betão e o diâmetro perpendicular a este (Figura D.2).

Para o valor do diâmetro de espalhamento da amostra de betão testada tomou-se a média dos dois diâmetros registados. O tempo que o betão demora a atingir o diâmetro de 500mm (T50, segundos) deve ser medido com um cronómetro desde o início do levantamento do cone até o primeiro betão atingir a circunferência dos 500mm. O tempo de final do escoamento (Tfinal, segundos) deve ser medido com um cronómetro desde o início do levantamento do cone até ao final do movimento da amostra de betão.

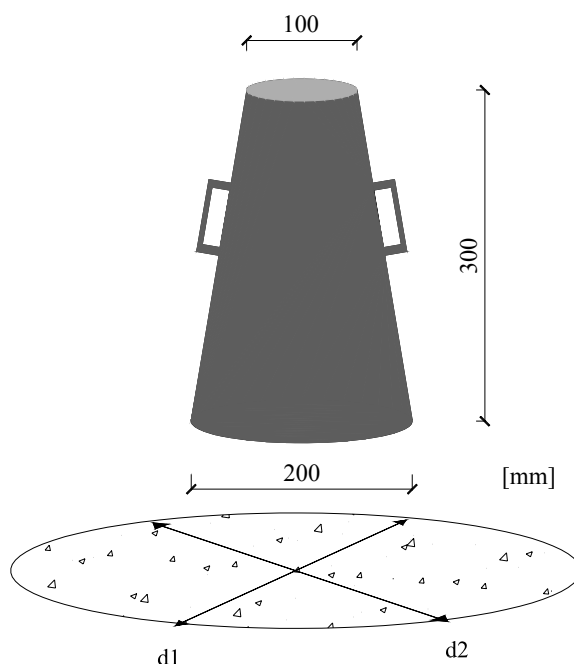


Figura D.2 – Equipamento para o ensaio de espalhamento do betão.

D.2 ENSAIOS DE FLUIDEZ

D.2.1 Ensaio de fluidez em pastas

O ensaio de fluidez em pastas, também designado por ensaio do cone de *Marsh*, utiliza um cone invertido, metálico ou plástico, aberto na parte superior e com uma abertura na parte inferior. Um determinado volume de material (V) é introduzido no cone e mede-se o tempo necessário para o escoamento de um volume ($v < V$). Na bibliografia é possível encontrar para o diâmetro da abertura valores que variam entre 5.0 a 12.5mm e para o volume inicial da pasta (V) valores entre 800 a 2000ml.

Para a medição do tempo de escoamento utilizou-se 1 litro de pasta que é introduzido no cone, iniciando-se o ensaio após 15 segundos. Em seguida mede-se o tempo

necessário para a pasta escoar e encher um volume de 500ml, sendo 300 segundos o valor máximo aceitável para o tempo de escoamento. Durante este trabalho o ensaio do cone de *Marsh* foi realizado com um cone, feito em material plástico, com as dimensões representadas na Figura D.3.

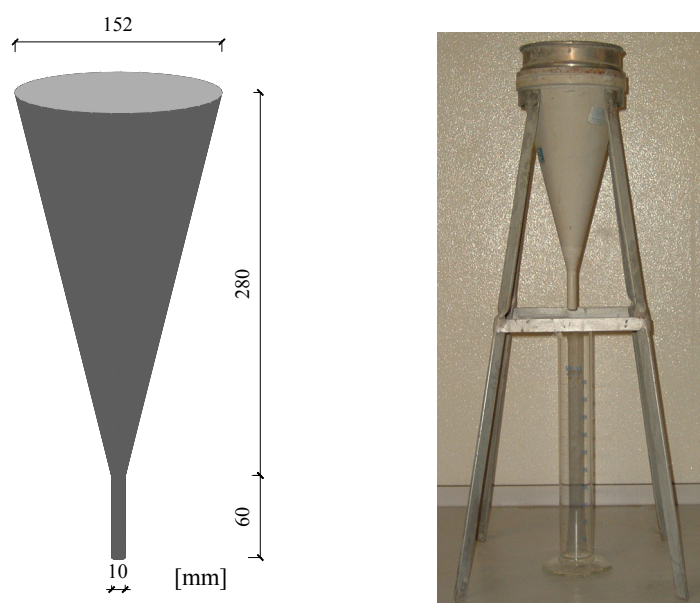


Figura D.3 – Cone de *Marsh* adoptado no ensaio

O procedimento utilizado para o ensaio com o cone de *Marsh* foi o seguinte:

1. Colocar o cone de ensaio de modo a que o seu eixo fique na posição vertical com a parte mais larga virada para cima;
2. Colocar o peneiro (malha quadrada de 1.5mm) na parte superior do cone;
3. Humedecer as paredes interiores do cone, com um pano húmido, mas sem escorrer água;
4. Fechar o orifício inferior do cone de ensaio (por exemplo, com o dedo);
5. Verter suavemente a pasta no cone de ensaio através do peneiro, evitando a formação de bolhas de ar e retendo as partículas mais grossas (grumos) de modo a evitar a interrupção do escoamento;
6. Abrir o orifício inferior após um determinado período de tempo (0 a 15 seg.) e, simultaneamente, iniciar a contagem do tempo com um cronómetro;

7. Parar a contagem do tempo quando estiver preenchido o volume pretendido. Registrar o tempo de escoamento com uma aproximação às décimas do segundo;
8. Registrar também a temperatura e humidade ambiente.

D.2.2 Ensaio de fluidez da argamassa

O ensaio de fluidez é realizado com um funil em chapa de aço, cujas dimensões se apresentam na Figura D.4, colocado numa estrutura de suporte para o manter na posição vertical. A parte inferior do funil contém um dispositivo de descarga, estanque enquanto fechado, de abertura rápida e sem interferir com a consequente descarga do betão. Para a realização deste ensaio, para além do funil, é necessário dispor de um cronómetro para a medição do tempo.

O procedimento adoptado neste ensaio foi o seguinte:

1. Humedecer o interior do funil com um pano húmido; colocar o funil e a estrutura de suporte numa superfície plana, nivelada e firme; posicionar o recipiente para receber a argamassa e fechar a comporta inferior;
2. Encher completamente o funil com a argamassa, de forma contínua e sem qualquer tipo de vibração, e nivelar a argamassa na parte superior;
3. Em seguida, abrir a comporta iniciando, simultaneamente, a contagem do tempo. Observar o movimento pela parte superior e parar a contagem do tempo com o aparecimento dos primeiros raios de luz no fundo do funil.

Este ensaio é realizado duas vezes em consecutivo.

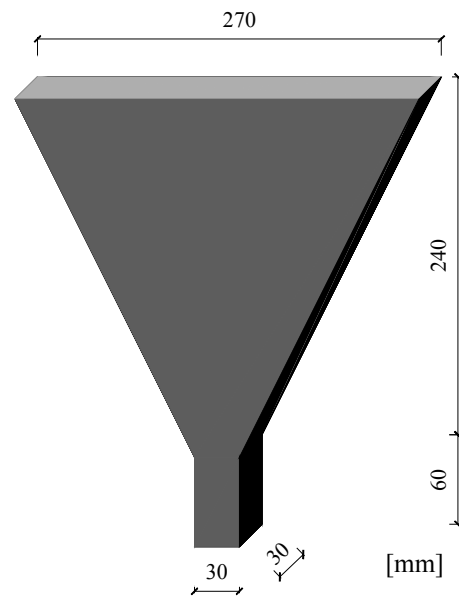


Figura D.4 – Equipamento para o ensaio de fluidez da argamassa

D.2.3 Ensaio de fluidez do betão

Para este ensaio utiliza-se um funil semelhante ao utilizado para as argamassas mas de dimensões superiores (Figura D.5). O procedimento adoptado para a medição do tempo de escoamento foi o mesmo que o descrito anteriormente para as argamassas.

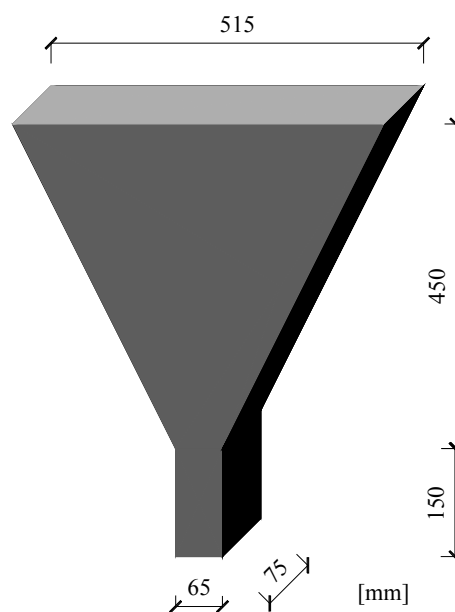


Figura D.5 – Equipamento para o ensaio de fluidez do betão

D.3 ENSAIOS DE AUTO-AUTOCOMPACTABILIDADE

D.3.1 Ensaio da caixa-U

A forma e dimensões do equipamento utilizado neste ensaio apresentam-se na Figura D.6. A caixa foi concebida em chapas de aço à exceção de uma das paredes onde se utilizou acrílico transparente para facilitar a medição da altura atingida pelo betão. Para este ensaio recomendam-se dois tipos de obstáculos: um deles, constituído por cinco varões de 10mm de diâmetro e o outro por três varões de 13mm de diâmetro. Adoptou-se o primeiro por se tratar do mais exigente. Na zona central desta caixa foram previstas duas ranhuras, na primeira encaixa a placa com o obstáculo e na segunda, o mais junto possível da primeira, desliza outra placa que funciona como comporta de separação dos dois compartimentos. É ainda necessária uma fita métrica para medir a altura do betão.

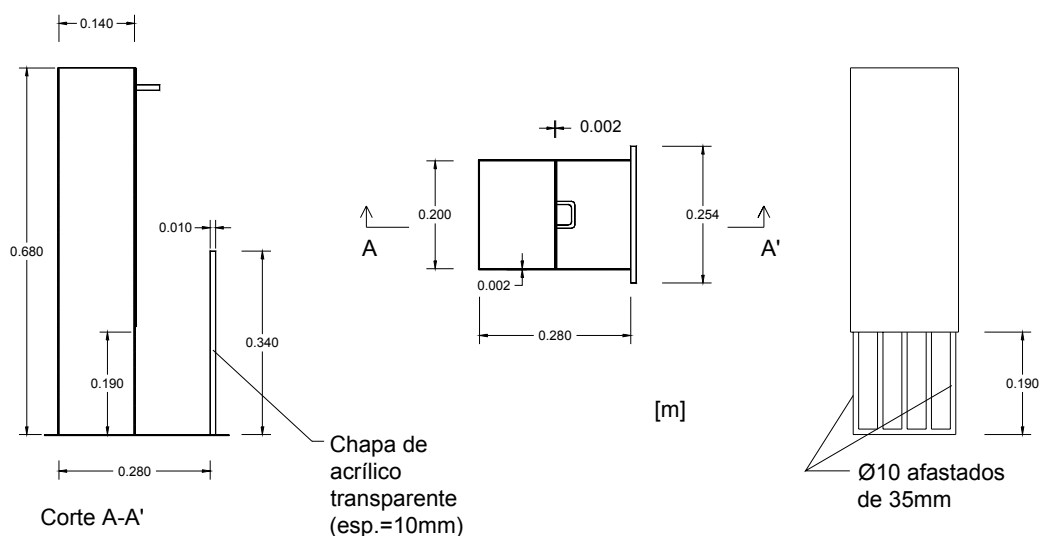


Figura D.6 – Forma e dimensões do equipamento utilizado no ensaio da caixa, incluindo a placa de obstáculo com os varões

Este ensaio foi conduzido do seguinte modo:

1. Instalar a placa do obstáculo e, à frente desta, a comporta de separação entre os dois compartimentos; humedecer as paredes interiores de ambos os compartimentos e colocar a caixa numa posição vertical (a parte superior na horizontal) sobre uma superfície plana, nivelada e firme;

2. Encher o compartimento maior com betão, de uma forma contínua, sem consolidar por vibração; nivelar o betão na parte superior e aguardar 1 minuto;
3. Levantar a comporta deixando o betão escoar do compartimento de depósito para o vazio, passando através do obstáculo constituído pelos varões espaçados;
4. Depois de cessar o movimento medir a altura alcançada pelo betão na coluna da direita, o que foi facilitado pela colocação de uma placa de acrílico nesta parte.

ANEXO E

DIMENSIONAMENTO EXPERIMENTAL APOIADO NA ESTATÍSTICA

E.1 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

E.1.1 Modelo de regressão linear múltipla. Hipóteses subjacentes

Um modelo de regressão linear múltipla descreve uma relação entre um conjunto de variáveis independentes, x_j ($j=1,2,...,J$), e uma variável dependente também quantitativa, Y , através da Equação (E.1):

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot (x_{1n} - \bar{x}_1) + \dots + \beta_j \cdot (x_{jn} - \bar{x}_j) + \varepsilon_n \quad (\text{E.1})$$

n : índice denotando as observações das variáveis x_1, \dots, x_J e y ($n=1, \dots, N$)

$(x_{1n}, \dots, x_{Jn}, y_n)$: n -ésima observação das variáveis x_1, \dots, x_J e y

\bar{x}_j : média aritmética das observações da variável x_j $\left(\bar{x}_j = 1/N \cdot \sum_n x_{jn} \right)$

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_J$: parâmetros fixos (desconhecidos, a estimar) da relação linear entre x_1, \dots, x_J e y

ε_n : erro aleatório associado ao valor observado y_n

As hipóteses subjacentes a este modelo são as seguintes:

- i) Os valores x_{jn} e, portanto, os valores \bar{x}_j são encarados como constantes predeterminadas, sem erro;
- ii) Os erros E_n são mutuamente independentes, tem valor esperado nulo, variância constante, σ^2 , e são Normalmente distribuídos, isto é, $E_n \Rightarrow IN(0, \sigma^2)$.

E.1.2 Estimativa dos parâmetros da regressão através do Método dos Mínimos Quadrados

Os parâmetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_J$ do modelo considerado na Equação (E.1) podem ser estimados a partir de um conjunto de observações $(x_{1n}, \dots, x_{Jn}, y_n)$ ($n = 1, \dots, N$, com $N > J + 1$) recorrendo ao método dos mínimos quadrados. O mínimo da função correspondente ao somatório do quadrado dos desvios (SEQ) (Equação E.2) :

$$SEQ = \sum_n E_n^2 = \sum_n \left\{ y_n - [\beta_0 + \beta_1(x_{1n} - \bar{x}_1) + \dots + \beta_J(x_{Jn} - \bar{x}_J)] \right\}^2 \quad (E.2)$$

Atinge-se para:

$$\begin{aligned} \frac{\partial SEQ}{\partial \beta_0} &= (-2) \cdot \sum_n [y_n - \beta_0 - \beta_1(x_{1n} - \bar{x}_1) - \dots - \beta_J(x_{Jn} - \bar{x}_J)] = 0 \\ \frac{\partial SEQ}{\partial \beta_1} &= (-2) \cdot \sum_n (x_{1n} - \bar{x}_1) [y_n - \beta_0 - \beta_1(x_{1n} - \bar{x}_1) - \dots - \beta_J(x_{Jn} - \bar{x}_J)] = 0 \\ &(\dots) \\ \frac{\partial SEQ}{\partial \beta_J} &= (-2) \cdot \sum_n (x_{Jn} - \bar{x}_J) [y_n - \beta_0 - \beta_1(x_{1n} - \bar{x}_1) - \dots - \beta_J(x_{Jn} - \bar{x}_J)] = 0 \end{aligned} \quad (E.3)$$

A partir da primeira destas equações, obtém-se para β_0 o seguinte estimador (Equação (E.4)):

$$A = \frac{1}{N} \sum_n y_n = \bar{y} \quad (E.4)$$

Desenvolvendo as restantes equações, obtém-se o seguinte sistema, a partir do qual se podem obter os estimadores B_1, \dots, B_J dos parâmetros β_1, \dots, β_J :

$$\begin{aligned} B_1 \cdot S_{x_1 x_1} + B_2 \cdot S_{x_1 x_2} + \dots + B_J \cdot S_{x_1 x_J} &= S_{x_1 y} \\ B_1 \cdot S_{x_2 x_1} + B_2 \cdot S_{x_2 x_2} + \dots + B_J \cdot S_{x_2 x_J} &= S_{x_2 y} \\ (...) \\ B_1 \cdot S_{x_J x_1} + B_2 \cdot S_{x_J x_2} + \dots + B_J \cdot S_{x_J x_J} &= S_{x_J y} \end{aligned} \quad (E.5)$$

Onde,

$$S_{x_{j1} x_{j2}} = \sum_n (x_{j1n} - \bar{x}_{j1})(x_{j2n} - \bar{x}_{j2}) \quad (E.6)$$

$$S_{x_j y} = \sum_n (x_{jn} - \bar{x}_j)(y_n - \bar{y}) \quad (E.7)$$

E.1.3 Teste de hipóteses relativo aos parâmetros de regressão

Sendo a selecção das variáveis independentes (regressores) realizada através do método regressivo, inicialmente incluem-se no modelo todos os regressores potenciais. Começa-se por testar a hipótese de que todos os parâmetros β_j ($j=1, \dots, J$), são nulos contra a hipótese de que pelo menos um deles é diferente de zero (equações (E.12) a (E.15)). Para realizar este teste pode recorrer-se à técnica de análise de variância, decompondo a variação total (VT) nas componentes variação devida à regressão (VDR) e variação residual (VR) (equações (E.8) a (E.11)). O Quadro E.1 sintetiza a análise de ANOVA para o caso do modelo de regressão linear múltipla.

$$VT = VDR + VR \quad (E.8)$$

$$VT = S_{yy} = \sum_n (y_n - \bar{y})^2 \quad (E.9)$$

$$\begin{aligned} VDR &= B_1 \cdot S_{x_1 y} + \dots + B_J \cdot S_{x_J y} = \\ &= \sum_n \left\{ \left[A + B_1 \cdot (x_{1n} - \bar{x}_1) + \dots + B_J \cdot (x_{Jn} - \bar{x}_J) \right] - \bar{y} \right\}^2 \end{aligned} \quad (E.10)$$

$$\begin{aligned}
 VR &= S_{yy} - (B_1 \cdot S_{x_1y} + \dots + B_J \cdot S_{x_Jy}) = \\
 &= \sum_n \left\{ y_n - \left[A + B_1 \cdot (x_{1n} - \bar{x}_1) + \dots + B_J \cdot (x_{Jn} - \bar{x}_J) \right] \right\}^2
 \end{aligned}
 \quad (E.11)$$

Quadro E.1 – Tabela ANOVA para o modelo de regressão linear múltipla

Fontes de Variação	Devida à regressão (DR)	Residual (R)	Total (T)
Variações (Somadas de desvios quadráticos)	(Variação “explicada” pela regressão) $VDR = B_1 \cdot S_{x_1y} + \dots + B_J \cdot S_{x_Jy}$	(Variação residual “não explicada”) $VR = S_{yy} - VDR$	(Variação total) $VT = S_{yy}$
Graus de Liberdade (Número de termos independentes)	$GL_1 = J$	$GL_2 = N - J - 1$	$GL = GL_1 + GL_2 = N - 1$
Desvios Quadráticos Médios	$DQMDR = VDR / GL_1$	$DQMR = VR / GL_2$	--
Valores Esperados	$E[DQMDR] = \sigma^2 + [f(B_1, \dots, B_J)]^2$	--	--

GL – grau de liberdade

DQMDR – desvio quadrático médio devido à regressão

DQMR – desvio quadrático médio devido ao resíduo

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_J = 0 \quad (E.12)$$

$$H_1 : \text{Algum } \beta_j \neq 0 \quad (j = 1, \dots, J) \quad (E.13)$$

$$\text{valor } F = \frac{DQMDR}{DQMR} \quad (E.14)$$

$$H_0 \text{ verdadeira} \Rightarrow \text{valor } F \rightarrow F_{J, N-J-1} \quad (E.15)$$

Quando a hipótese nula é rejeitada, conclui-se que algum dos parâmetros β_j é diferente de zero e portanto a variável independente correspondente não é significativa para explicar a variação. A identificação dos parâmetros β_j diferentes de zero é realizada retirando do modelo um a um consoante a sua menor contribuição para explicar a variação.

E.1.4 Análise de resíduos

Quando foi definido o modelo de regressão linear referiu-se que os erros ou resíduos (E_n) do modelo serviam quer para estimar os coeficientes de regressão quer para validar os pressupostos de aplicação do modelo de regressão linear. Com vista a averiguar algumas das violações dos pressupostos do modelo (análise de resíduos) pode-se recorrer à análise gráfica de resíduos. O diagnóstico dos modelos e análise de resíduos é assim realizado à custa da observação do seguinte conjunto de representações:

- a) Representação dos valores medidos versus valores estimados pelo modelo: pretende-se que os pontos se aproximem o mais possível da diagonal no gráfico.
- b) Representação dos resíduos estudentarizados internos em escala normal: os testes de hipóteses e os intervalos estimados pressupõem que a distribuição dos erros siga uma lei normal, ou seja, neste tipo de representação os pontos devem ficar aproximadamente alinhados segundo uma recta. Uma distribuição dos pontos não-linear (por exemplo, com uma forma em S) pode ser eventualmente corrigida através de uma transformação de variáveis do tipo \sqrt{y} , $\ln y$ ou $1/y$. Para eliminar os efeitos da magnitude da escala de medida sobre os erros, é comum standardizar os resíduos de modo a que a média se mantenha em zero e o desvio padrão seja unitário (Equação (E.16)).

$$E'_j = \frac{E_j}{\sqrt{\text{DQMR}}} \quad (\text{E.16})$$

E'_j : resíduo standardizado correspondente à observação j

E_j : resíduo correspondente à observação j

DQMR: Desvio quadrático médio dos resíduos

Porém, na prática os erros apresentam sempre algum tipo de correlação e raramente as variâncias são exactamente iguais. Estas variâncias dependem do local onde as observações x_{ij} que dá origem ao resíduo E_j se encontram no domínio das variáveis independentes pelo que a variância dos erros deve ser ponderada por uma medida da influência que esta observação possui. A variância dos erros deve ser calculada como

$\text{Var}(E_j) = \text{DQMR}(1 - h_{jj})$ onde h_{jj} é o elemento da diagonal da matriz H (Maroco, 2003). A matriz H , também conhecida por matriz “chapéu”, transforma os valores observados da variável de resposta (y_j) nos valores ajustados pelo modelo da mesma variável (\hat{y}). Assim, uma forma precisa de standardizar os resíduos, é a apresentada na Equação (E.17), que agora se designam por resíduos estudentarizados.

$$r_j = \frac{E_j}{\sqrt{\text{DQMR}(1 - h_{jj})}} \quad (\text{E.17})$$

r_j : resíduo estudentarizado interno correspondente à observação j

E_j : resíduo correspondente à observação j

DQMR: Desvio quadrático médio dos resíduos

h_{jj} : elemento da diagonal da matriz H , correspondente à observação j

Os resíduos estudentarizados possuem variância constante (igual a 1) independente do local onde a observação x_{ij} se encontra (o que não acontece com E_j ou E'_j) quando a forma do modelo ajustada é correcta (Maroco, 2003).

- c) Representação dos resíduos estudentarizados internos versus valores: os erros devem apresentar variância constante na direcção vertical e a dispersão dos pontos deve ser simétrica relativamente ao eixo horizontal que passa em zero.
- d) Representação da *distância de Cook* (Di): um valor com $Di > 1$ indica que o respectivo resultado tem uma influência grande nas propriedades do modelo (Montgomery e Runger, 1999). As observações influentes são aquelas que individualmente ou em conjunto com outras observações demonstram ter maior impacto, do que as restantes observações, no cálculo do valor dos vários estimadores (coeficientes, valores previstos e testes estatísticos). Existindo observações influentes devem ser investigadas, sendo que uma das formas de as identificar é através da *distância de Cook*, (Equação (E.18)).

$$D_j = \frac{r_j}{J} \frac{h_{jj}}{(1 - h_{jj})} \quad (\text{E.18})$$

D_j : distância de Cook correspondente à observação j

r_j : resíduo estudentarizado interno correspondente à observação j

J : graus de liberdade da regressão

h_{jj} : elemento da diagonal da matriz H , correspondente à observação j

- e) Representação dos resíduos estudentarizados externos para averiguar a existência de outliers: valores fora do intervalo $(-2, 2)$ podem indicar a presença de outliers, isto é, observações distintas das demais que estão associadas a resíduos com valores elevados (Montgomery e Runger, 1999). A estatística r_j tem distribuição aproximada t-student, pelo que a distribuição exacta é apresentada pela estatística que caracteriza os resíduos estudentarizados externos (Equação (E.19)) (Maroco, 2003).

$$t_j = \frac{E_j}{s_{-j} \sqrt{1 - h_{jj}}} \quad (\text{E.19})$$

t_j : resíduo estudentarizado externo correspondente à observação j

E_j : resíduo correspondente à observação j

s_{-j} : desvio padrão dos erros calculados a partir do modelo ajustado sem a observação X_{ij}

h_{jj} : elemento da diagonal da matriz H , correspondente à observação j

E.2 DIAGNÓSTICO DOS MODELOS E ANÁLISE DE RESÍDUOS

Nos pontos seguintes fornece-se informação adicional que fundamenta a escolha dos modelos apresentados anteriormente. Para cada uma das propriedades analisadas apresenta-se o modelo ajustado com as variáveis em valores codificados e valores reais, o quadro da análise de variância, a análise descritiva dos resultados obtidos, o coeficiente de correlação e coeficiente de correlação ajustado e os intervalos de confiança para um nível

de 95% para os coeficientes estimados. A análise de resíduos dos modelos foi realizada à custa da observação das cinco representações gráficas descritas no ponto anterior.

E.2.1 Diâmetro de espalhamento

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} \text{Desp} &= \\ &650.53 \\ &+58.67 * A \\ &+8.21 * B \\ &+23.50 * C \\ &-8.46 * E \\ &+10.44 * C * E \\ &-6.95 * A^2 \end{aligned}$$

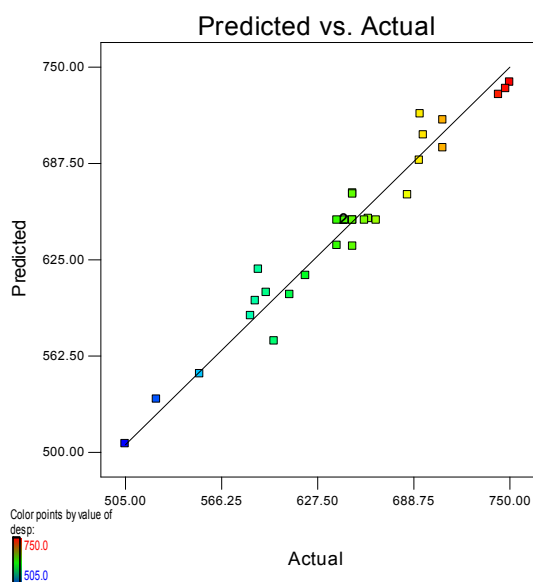
Final Equation in Terms of Actual Factors:

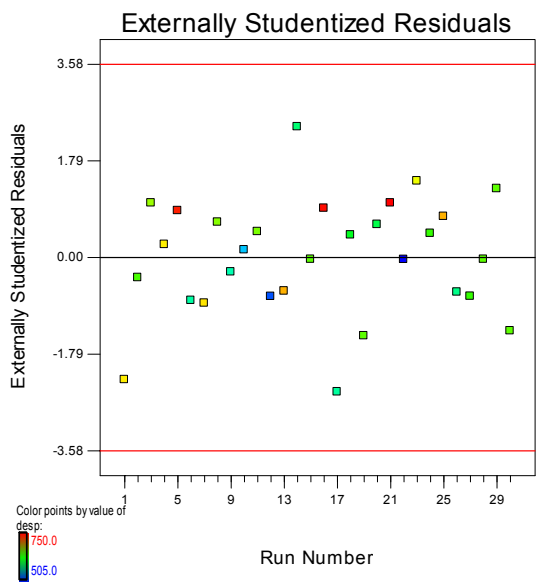
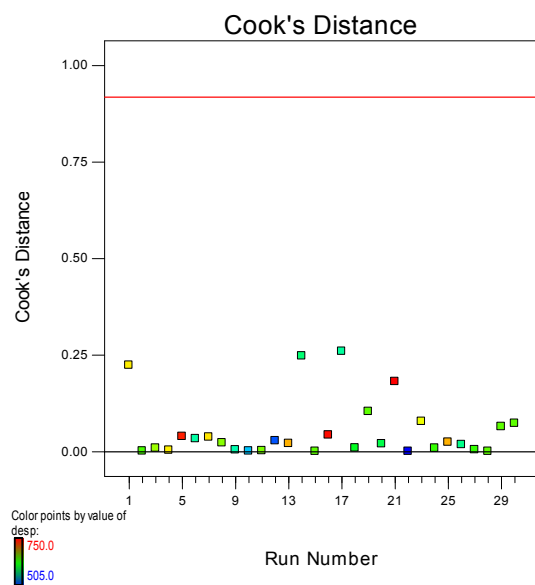
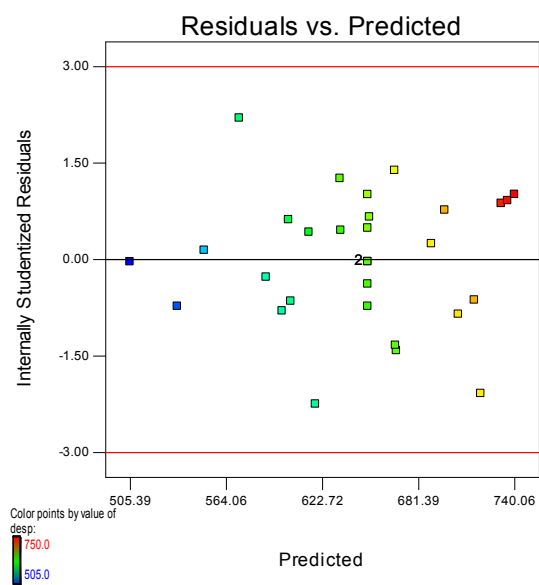
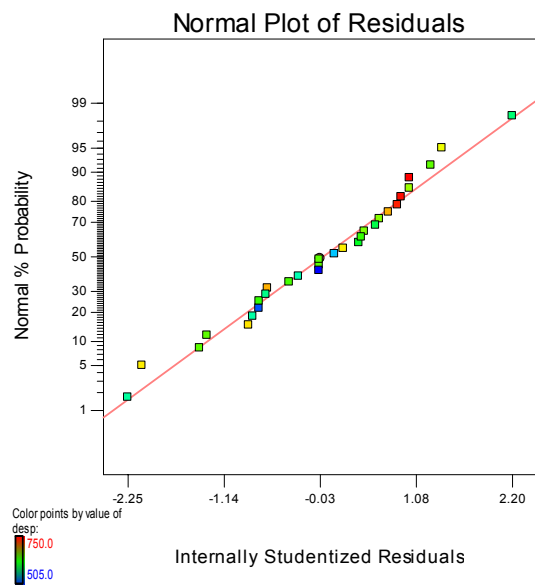
$$\begin{aligned} \text{Desp} &= \\ &4114.72 \\ &+3805.65 * Vw/Vp \\ &+215.49 * wf/wc \\ &-227766,34 * Sp/p \\ &-10593.15 * Vap \\ &432967,03 * Sp/p * Vap \\ &-1690.51 * Vw/Vp^2 \end{aligned}$$

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	102325.48	6	17054.25	77.76	< 0.0001	Significant
A	82602.67	1	82602.67	376.66	< 0.0001	
B	1617.04	1	1617.04	7.37	0.0123	
C	13254.00	1	13254.00	60.44	< 0.0001	
E	1717.04	1	1717.04	7.83	0.0102	
CE	1743.06	1	1743.06	7.95	0.0097	
A ²	1391,67	1	1391,67	6.35	0.0192	
Residual	5043.99	23	229.30			
Lack of Fit	4814.30	20	240.71	3.31	0.1878	not significant
Pure Error	229.69	3	76.56			
Cor Total	107369.47	29				

Std. Dev.	14.81	R-Squared	0.9530
Mean	644.97	Adj R-Squared	0.9408
C.V.	2.30	Pred R-Squared	0.9150
PRESS	9124.73	Adeq Precision	32.805

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	650.52	1	3.49	642.31	657.75	
A-Vw/Vp	58.67	1	3.02	52.41	64.92	1.00
B-wf/wc	8.21	1	3.02	1.96	14.46	1.00
C-Sp/p	23.50	1	3.02	17.25	29.75	1.00
E-Vap	-8.46	1	3.02	-14.71	-2.21	1.00
CE-(Sp/p. Vap)	10.44	1	3.70	2.78	18.10	1.00
$A^2-(Vw/Vp)^2$	-6.95	1	3.76	-12.66	-1.24	1.00





E.2.2 Tempo necessário para alcançar um diâmetro de 500mm

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned}
 T50 &= \\
 &2.94 \\
 &-1.29 * A \\
 &-0.11 * B \\
 &-0.36 * C \\
 &-0.035 * D \\
 &+0.22 * E \\
 &+0.34 * B * D \\
 &-0.45 * C * E \\
 &+0.32 * A^2
 \end{aligned}$$

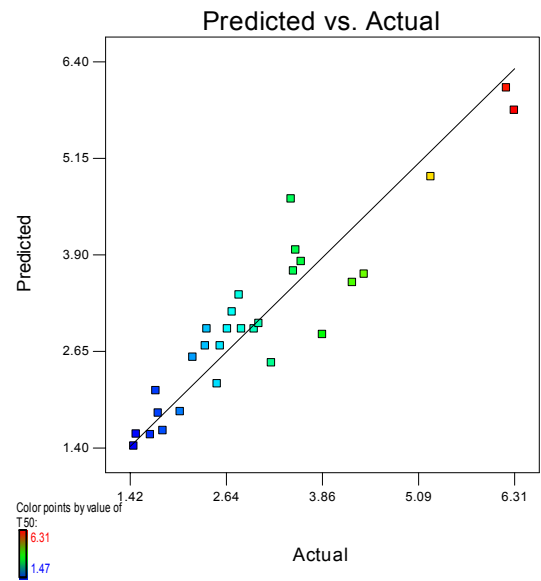
Final Equation in Terms of Actual Factors:

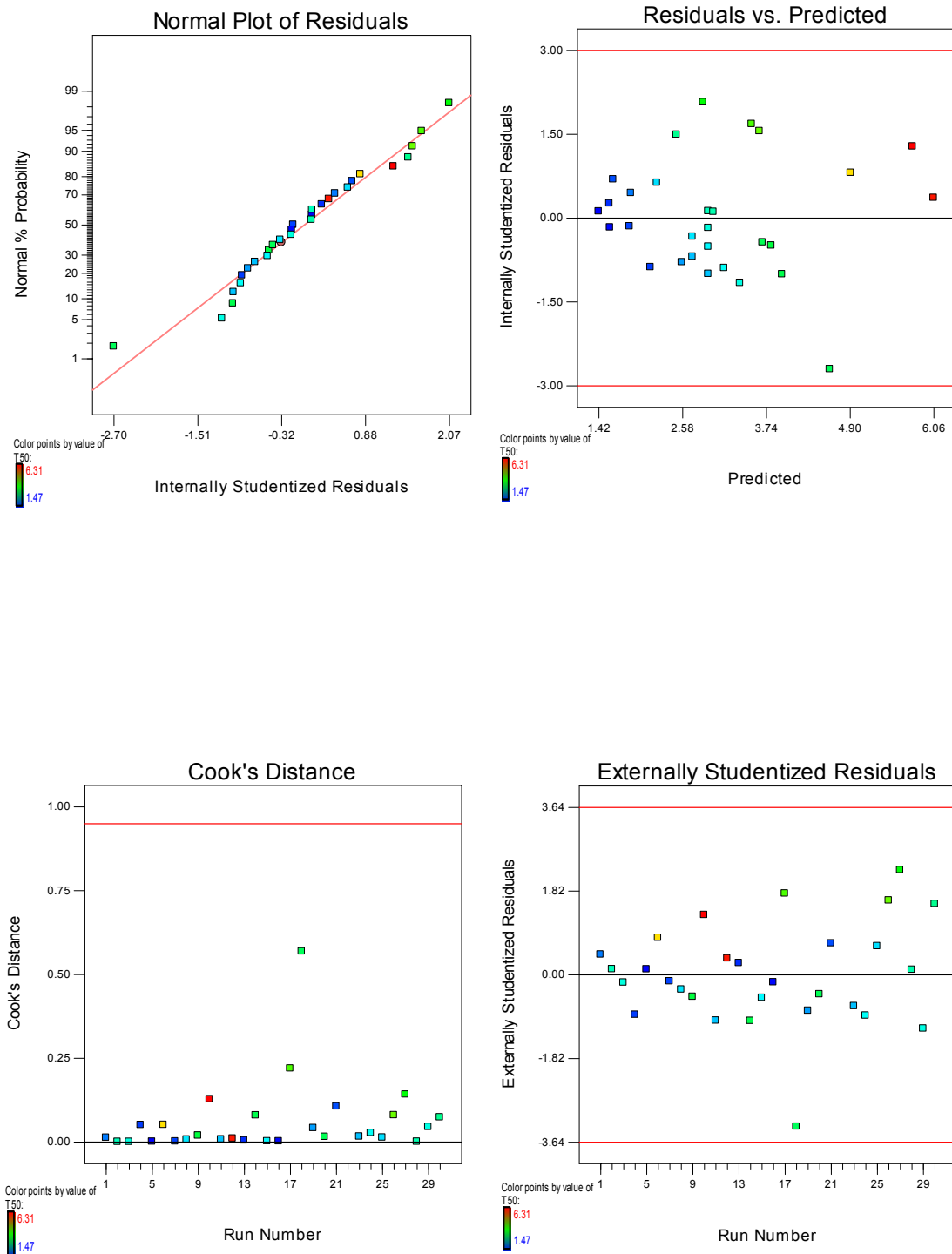
$$\begin{aligned}
 T50 &= \\
 &-120.28 \\
 &-151.64 * Vw/Vp \\
 &-93.28 * wf/wc \\
 &+10214.56 * Sp/p \\
 &-61.87 * s1/s \\
 &+446.90 * Vap \\
 &+120.89 * wf/wc * s1/s \\
 &-18692.77 * Sp/p * Vap \\
 &+76.91 * Vw/Vp^2
 \end{aligned}$$

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	39.15	8	4.89	15.99	< 0.0001	significant
A	29.07	1	29.07	95.01	< 0.0001	
B	0.29	1	0.29	0.94	0.3434	
C	3.03	1	3.03	9.91	0.0051	
D	0.03	1	0.030	0.098	0.7570	
E	1.16	1	1.16	3.78	0.0660	
BD	1.90	1	1.90	6.20	0.0217	
CE	3.25	1	3.25	10.62	0.0039	
A ²	1.60	1	1.60	5.23	0.0332	
Residual	6.12	20	0.31			
Lack of Fit	5.92	17	0.35	5.26	0.0984	not significant
Pure Error	0.20	3	0.07			
Cor Total	45.27	28				

Std. Dev.	0.55	R-Squared	0.8648
Mean	3.06	Adj R-Squared	0.8108
C.V.	18.05	Pred R-Squared	0.6956
PRESS	13.78	Adeq Precision	15.054

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	2.94	1	0.14	2.65	3.22	
A-Vw/Vp	-1.29	1	0.13	-1.57	-1.01	1.14
B-wf/wc	-0.11	1	0.11	-0.35	0.13	1.00
C-Sp/p	-0.36	1	0.11	-0.59	-0.12	1.00
D-s1/s	-0.035	1	0.11	-0.27	0.20	1.00
E-Vap	0.22	1	0.11	-0.016	0.46	1.00
BD	0.34	1	0.14	0.056	0.63	1.00
CE	-0.45	1	0.14	-0.74	-0.16	1.00
A ²	0.32	1	0.14	0.028	0.60	1.14





E.2.3 Tempo de escoamento no funil-V

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} 1/\text{Sqrt}(\text{Tfunil}) &= \\ &0.30 \\ &+0.053 * A \\ &+0.006 * B \\ &+0.004 * D \\ &-0.009 * B * D \end{aligned}$$

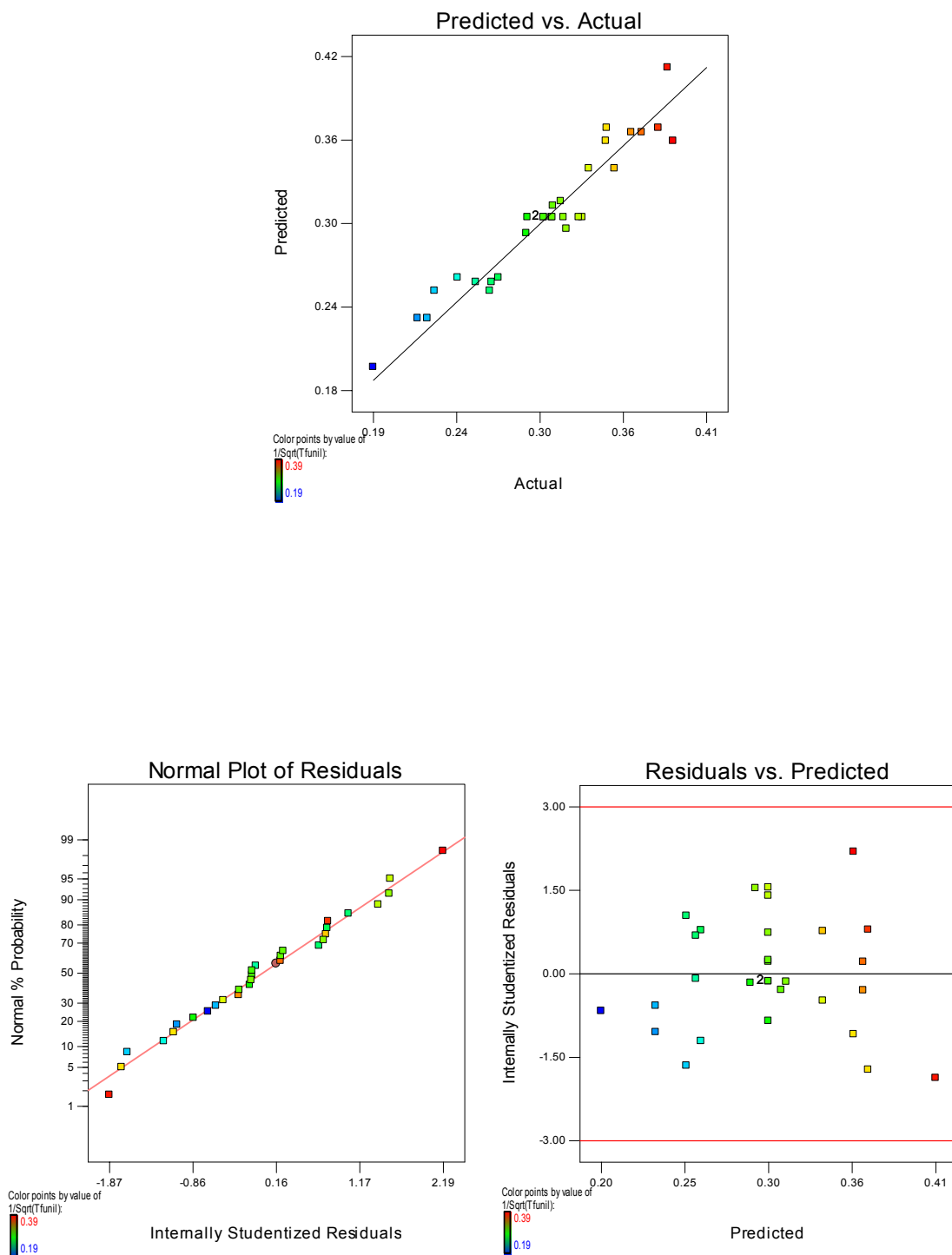
Final Equation in Terms of Actual Factors:

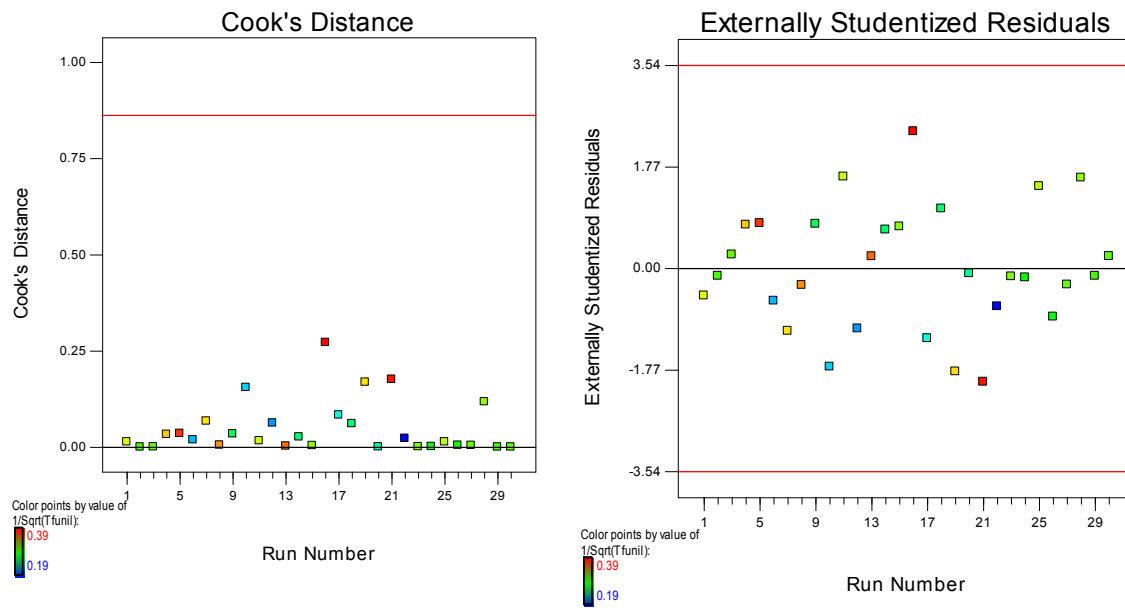
$$\begin{aligned} 1/\text{Sqrt}(\text{Tfunil}) &= \\ &-1.71 \\ &+0.84 * V_w/V_p \\ &+2.47 * w_f/w_c \\ &+1.63 * s_1/s \\ &-3.10 * w_f/w_c * s_1/s \end{aligned}$$

ANOVA for Response Surface Reduced 2FI Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.072	4	0.018	73.25	< 0.0001	significant
A	0.069	1	0.069	283.00	< 0.0001	
B	0.0007	1	0.0008	3.24	0.0841	
D	0.0004	1	0.0004	1.67	0.2080	
BD	0.0012	1	0.0012	5.09	0.0331	
Residual	0.0061	25	0.0003			
Lack of Fit	0.0058	22	0.0003	2.09	0.2997	not significant
Pure Error	0.00038	3	0.0001			
Cor Total	0.078	29				

Std. Dev.	0.016	R-Squared	0.9214
Mean	0.30	Adj R-Squared	0.9088
C.V.	5.15	Pred R-Squared	0.8820
PRESS	0.0092	Adeq Precision	33.645

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	0.30	1	0.0029	0.30	0.31	
A-Vw/Vp	0.054	1	0.0032	0.047	0.060	1.00
B-wf/wc	0.0058	1	0.0032	-0.0009	0.012	1.00
D-s1/s	0.0041	1	0.0032	-0.0025	0.011	1.00
BD-(wf/wc. s1/s)	-0.0088	1	0.0039	-0.017	-0.0007	1.00





E.2.4 Altura de enchimento

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned}
 H &= \\
 &+333.36 \\
 &+8.13 * A \\
 &+2.79 * C \\
 &-3.54 * E \\
 &+3.44 * C * E \\
 &-3.95 * A^2
 \end{aligned}$$

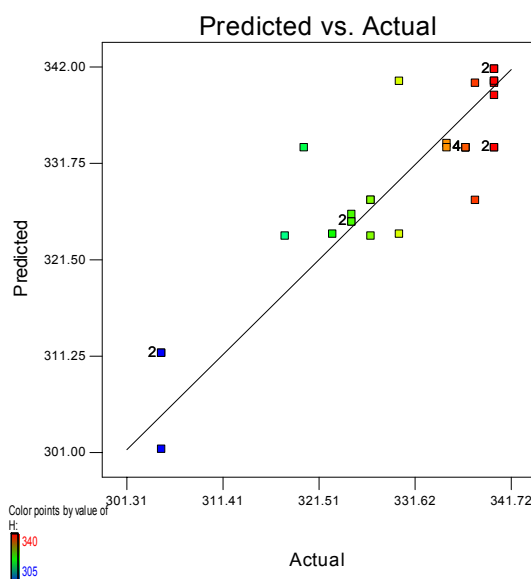
Final Equation in Terms of Actual Factors:

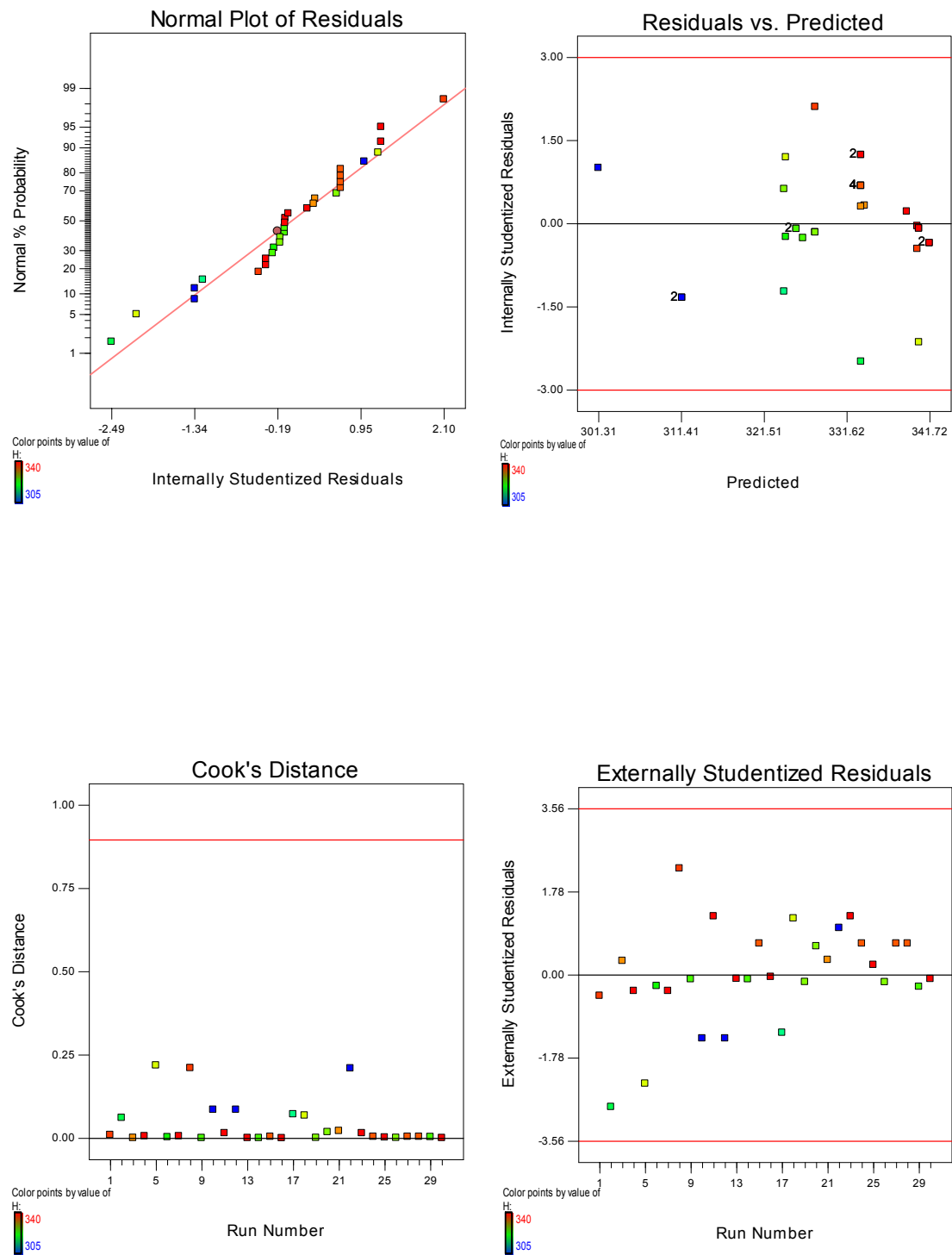
$$\begin{aligned}
 H &= \\
 &1460.34 \\
 &+1769.91 * Vw/Vp \\
 &-77873.16 * Sp/p \\
 &-3543.01 * Vap \\
 &+142593.90 * Sp/p * Vap \\
 &-960.94 * Vw/Vp^2
 \end{aligned}$$

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	2711.19	5	542.24	17.79	< 0.0001	significant
A	1584.38	1	1584.38	51.97	< 0.0001	
C	187.04	1	187.04	6.14	0.0207	
E	301.04	1	301.04	9.88	0.0044	
CE	189.06	1	189.06	6.20	0.0201	
A ²	449.67	1	449.67	14.75	0.0008	
Residual	731.61	24	30.48			
Lack of Fit	493.61	21	23.51	0.30	0.9624	not significant
Pure Error	238.00	3	79.33			
Cor Total	3442.80	29				

Std. Dev.	5.52	R-Squared	0.7875
Mean	330.20	Adj R-Squared	0.7432
C.V.	1.67	Pred R-Squared	0.6836
PRESS	1089.34	Adeq Precision	16.369

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	333.36	1	1.30	330.68	336.05	
A-Vw/Vp	8.13	1	1.13	5.80	10.45	1.00
C-Sp/p	2.79	1	1.13	0.47	5.12	1.00
E-Vap	-3.54	1	1.13	-5.87	-1.22	1.00
CE-(Sp/p. Vap)	3.44	1	1.38	0.59	6.29	1.00
A ²	-3.95	1	1.03	-6.07	-1.83	1.00





E.2.5 Resistência à compressão aos 28 dias, em cubos

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned}
 f_{c,28\text{days}} &= \\
 &63.00 \\
 &-3.29 * A \\
 &-1.11 * B \\
 &+1.25 * C \\
 &+1.26 * D \\
 &-0.67 * E \\
 &-1.24 * C * E \\
 &-1.46 * E^2
 \end{aligned}$$

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\begin{aligned}
 f_{c,28\text{days}} &= \\
 &-2874.14 \\
 &-51.34 * V_w/V_p \\
 &-29.15 * w_f/w_c \\
 &+29486.44 * S_p/p \\
 &+16.87 * s_1/s \\
 &+9501.91 * V_{ap} \\
 &-51604.93 * S_p/p * V_{ap} \\
 &-7498.64 * V_{ap}^2
 \end{aligned}$$

ANOVA for Response Surface Reduced Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	461.89	7	65.98	9.91	< 0.0001	significant
A	260.14	1	260.14	39.05	< 0.0001	
B	29.59	1	29.58	4.44	0.0467	
C	37.23	1	37.23	5.59	0.0273	
D	38.19	1	38.19	5.73	0.0256	
E	10.89	1	10.90	1.64	0.2142	
CE	24.76	1	24.76	3.72	0.0062	
E ²	61.08	1	61.08	9.17	0.0669	
Residual	146.54	22	6.66			
Lack of Fit	141.15	19	7.43	4.13	0.1342	not significant
Pure Error	5.40	3	1.80			
Cor Total	608.43	29				

Std. Dev.	2.58	R-Squared	0.7591
Mean	61.84	Adj R-Squared	0.6825
C.V.	4.17	Pred R-Squared	0.5381
PRESS	281.03	Adeq Precision	10.790

Factor	Coefficient Estimate	DF	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	63.00	1	0.61	61.74	64.26	
A-Vw/Vp	-3.29	1	0.53	-4.38	-2.20	1.00
B-wf/wc	-1.11	1	0.53	-2.20	-0.017	1.00
C-Sp/p	1.25	1	0.53	0.15	2.34	1.00
D-s1/s	1.26	1	0.53	0.17	2.35	1.00
E-Vap	-0.67	1	0.53	-1.77	0.42	1.00
CE-(Sp/p. Vap)	-1.24	1	0.65	-2.58	0.094	1.00
E ² -(Vap) ²	-1.46	1	0.48	-2.45	-0.46	1.00

